



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ELMERI KRYSSI
PUUKERROSTALO
Diplomityö

Tarkastaja: professori Ralf Lindberg
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tuotantotalouden ja rakentamisen
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
4. joulukuuta 2013.

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

KRYSSI, ELMERI: Puukerrostalo

Diplomityö, 88 sivua, 21 liitesivua

Joulukuu 2013

Pääaine: Rakennetekniikka

Tarkastaja: professori Ralf Lindberg

Avainsanat: Puukerrostalo, teollinen rakentaminen, suurelementti, tilaelementti, pilari-palkkiteknikka

Maailmanlaajuiset ympäristönsuojelukysymykset ja perinteisen puuteollisuuden kuihtuminen ovat aiheuttaneet muutoksen Suomen kerrostalorakentamisessa. Ne ovat asettaneet entistä painavammat perusteet puun käytölle, koska puu on ympäristöystävällinen materiaali ja sitä kasvaa metsissämme runsaasti. Valtiovalta on uusien rakentamismääräysten myötä sallinut suurimittakaavaisen puurakentamisen, ja isot metsäteollisuusyritykset ovat ottaneet puukerrostalojen rakentamisen osaksi liiketoimintaansa.

Puukerrostalojen osuus on Suomen kerrostalorakentamisesta vain sadasosa. Siksi betonikerrostalorakentamiseen orientoituneilta rakennusliikkeiltä puuttuu tietotaitoa puukerrostalon rakentamisesta. Tässä työssä tutkitaan suomalaista puukerrostaloa ja sen rakentamista. Työn tavoitteena on määrittää, millaisia puukerrostaloja Suomeen voidaan rakentaa ja miten niitä rakennetaan.

Työn ydinasia jakaantuu kolmeen kokonaisuuteen. Kaksi ensimmäistä kokonaisuutta ovat pääpiirteiltään kirjallisuustutkimusosuuksia. Ne on kirjoitettu asiantuntijahaastattelusta ja kirjallisuudesta kerättyjen tietojen perusteella. Ensimmäinen osuus käsittelee puukerrostalorakenteiden erityispiirteitä, jotka huomioimalla terveellinen ja turvallinen puukerrostalo voidaan rakentaa. Toisessa osassa määritellään, miten puukerrostalon rakentamisesta saadaan kilpailukykyinen ja kustannustehokas verrattuna betonikerrostalojen rakentamiseen. Kolmas osuus on asiantuntijahaastatteluihin ja työmaavierailuihin perustuva kokonaisuus. Siinä tutkitaan puukerrostalon rakentamista kolmella eri rakentamistekniikalla. Kunkin rakentamistekniikan hyvät ja huonot puolet käydään läpi ja arvioidaan niiden soveltuvuutta erilaisiin puukerrostaloprojekteihin.

Tutkimus osoittaa, että puu on materiaalina hyvin soveltuva suurimittakaavaiseen kerrostalorakentamiseen. Puun erityispiirteiden huomioiminen ja puukerrostalon rakentamisprosessin teollistaminen ovat avainasemassa kustannustehokkaan ja kilpailukykyisen lopputuloksen saavuttamisessa. Puun käyttö pitää ottaa huomioon rakentamisprojektin alkuvaiheessa, koska puukerrostaloa ei voida rakentaa betonikerrostalon tapaan.

Puukerrostalon rakentamistekniikat ovat viime vuosien aikana kehittyneet. Ne pystyvät vastaamaan Suomen ankarien sääolosuhteiden asettamiin haasteisiin ja loppukäyttäjien vaatimuksiin. Puukerrostalon rakenteet on osoitettu toimiviksi ja kokonaiskustannukset kilpailukykyisiksi. Lopullista läpimurtoa rakennusliikkeiden keskuudessa ei ole vielä tapahtunut, koska vanhat tavat kuolevat hitaasti. Läpimurto tapahtuu, kun puun tuomien lisäarvojen ymmärtämisen kautta puun käyttö alkaa näkyä myös rahallisesti.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

KRYSSI, ELMERI: Multi-story timber building

Master of Science Thesis, 88 pages, 21 appendix pages

December 2013

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Ralf Lindberg

Keywords: Multi story timber building, industrial construction, modular construction, timber frame

Worldwide environmental questions and wilting of the traditional lumber industry have caused a change in the Finnish multi-story construction. They have guided construction towards timber structures because wood is ecological material there are lots of forests in Finland. State authorities have set new specifications that allow multi story timber buildings and big lumber industry corporations have stated multi-story timber buildings as a new business area.

The percentage of timber buildings in multi-story building market is only one. That's why there is a lack of knowhow of multi-story timber construction in construction companies. This work studies the structures and building of Finnish multi-story timber building. The goal of this study is to define what kind of qualities are required and how multi-story timber building can be built in Finland.

There are three main aggregations in this work. First and second are literary surveys and they have written from information based on expert interviews and literature. First part deals with special qualities of timber structures that are mandatory to achieve safe and healthy building. Second part defines how construction of multi-story timber building can be made competitive with traditional concrete multi-story building. Third main aggregation is about the erection of timber multi-story building. It presents three different erection methods. Qualities of these methods and their suitability for different buildings are evaluated.

The study indicates that timber is very suitable material for multi-story buildings. The key features are paying attention to the special qualities of timber and industrialization that leads to modularity. Timber qualities must be paid attention at early stage of construction process because timber multi-story buildings can't be built like concrete multi-story buildings.

Erection methods are developed within few years. Nowadays they can match the challenges set by Finnish weather conditions and demands of end users. Structures of multi-story timber buildings are proven to be functional and the total building costs are equal to any other building material. However the final breakthrough among construction companies isn't happened because old habits die hard. It will happen when understanding of added values of timber are realized financially.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty samanaikaisesti toisen puukerrostaloaiheisen diplomityön kanssa. Molemmat on tehty työsuhteessa Optiplan Oy:ssä NCC Rakennus Oy:n toimeksiannosta. Töiden ohjauksesta vastasi NCC:n ja Optiplanin puolelta diplomityöryhmä, jonka puheenjohtajana toimi NCC Asumisen kehityspäällikkö arkkitehti (SAFA) Antti Pirhonen. Tampereen teknillisen yliopiston osalta työni ohjaaja oli professori Ralf Lindberg.

Työni aiheen määritti NCC Asumisen kehitysosasto, ja sen rahoittivat NCC Rakennus Oy ja Optiplan Oy. Tarkoituksenmukaisen sisällön aikaansaamiseksi diplomityön ohjaustyöryhmä ja Ralf Lindberg antoivat asiantuntevia neuvoja. Turun NCC mahdollisti monet käynnit puukerrostalotyömailla ja lukuisat tapaamiset eri puukerrostalotoimittajien kanssa. Työnantajani oli erittäin joustava ja ymmärtävä diplomityöni ajankäyttöön liittyvissä asioissa. Sain tehdä työtäni ilman suurempia muiden töiden aiheuttamia paineita. Toisen diplomityön tekijän Jonna Tynkynniemen kanssa kävimme monta antoisaa keskustelua ja teimme mielenkiintoisia tutustumismatkoja puuteollisuuteen. Kiitän suuresti kaikkia edellä mainittuja! Kiitoksen ovat ansainneet myös kaikki liitteessä 1 mainitut asiantuntijat, jotka ovat uhranneet aikaansa vastaamalla puukerrostaloihin liittyviin kysymyksiini.

Suurin kiitos opintojeni suorittamisessa kuuluu rakkaille vanhemmilleni, jotka ovat auttaneet ja tukeneet minua koko pitkän yliopistoajan.

Turussa 27.12.2013

Elmeri Kryssi

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
1.1	Tausta	1
1.2	Tutkimusongelma ja tavoitteet.....	2
1.3	Rajaukset	2
1.4	Tutkimusmenetelmät.....	3
1.5	Rakenne	3
1.6	Samanaikaiset tutkimukset ja tuotokset	4
2	Puukerrostalojen historia	5
2.1	Puurakentamisen historia.....	5
2.1.1	Kodasta kaupunkeihin.....	5
2.1.2	Rankarakenteiden synty	5
2.1.3	Suomen puurakentaminen	6
2.2	Puukerrostalojen kehitys	6
2.2.1	Kerroksellinen rakentaminen	6
2.2.2	Nykyaikaisen puukerrostalon juurilla	7
2.3	Suomen puukerrostalorakentaminen	8
2.3.1	Ensimmäiset puukerrostalot	8
2.3.2	Nykyaikaiset puukerrostalot.....	9
3	Puukerrostalorakenteiden erityiskysymyksiä	10
3.1	Paloturvallisuus.....	10
3.1.1	Puun palotekniset ominaisuudet	10
3.1.2	Paloturvallinen rakennus	11
3.1.3	Palomääräysten historia	12
3.1.4	Nykyiset palomääräykset	13
3.1.5	Automaattinen sammutuslaitteisto.....	18
3.1.6	Toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu	19
3.2	Ääneneristys	21
3.2.1	Äänen ominaisuudet.....	21
3.2.2	Rakennusten akustiikka.....	23
3.2.3	Ilma- ja askelääneneristys	24
3.2.4	Rakennusten ääneneristysmääräykset	25
3.2.5	Puukerrostalorakenteiden ääneneristys	26
3.3	Puurakenteiden suunnittelu.....	28
3.3.1	Rakennesuunnitteluperusteet.....	28
3.3.2	Värähtely	29
3.3.3	Taipuma.....	31
3.3.4	Puun lujuus.....	32
3.3.5	Puurakenteiden massa ja paksuus	34
3.4	Kosteuden hallinta.....	36
3.4.1	Puun kosteustekniset ominaisuudet	36
3.4.2	Kosteusteknisesti toimivat rakenteet	37

	3.4.3	Lämpötekniset ominaisuudet.....	39
4		Teollinen puukerrostalorakentaminen.....	40
	4.1	Moderni puukerrostalo	40
	4.1.1	Puukerrostalon maine.....	40
	4.1.2	Lean-rakentaminen	40
	4.1.3	Kilpailukykyinen puukerrostalo	41
	4.1.4	Elementtitekniikan kehitys Suomessa.....	42
	4.1.5	Puuelementtien terminologiaa	43
	4.1.6	Runko-PES 1.0	45
	4.2	Massiivipuun käyttö puukerrostaloissa	47
	4.2.1	Vanhassa vara parempi	47
	4.2.2	Puukerrostalojen massiivipuuelementit	47
	4.2.3	Hyödyt ja haitat	49
5		Puukerrostalon betoni- ja teräsrakenteet	52
	5.1	Betonirakenteet	52
	5.1.1	Perustukset	52
	5.1.2	Muut betonirakenteet	53
	5.2	Teräsrakenteet.....	54
	5.2.1	Kantavat teräsrakenteet	54
	5.2.2	Liitokset.....	55
	5.3	Komposiittirakenteet	56
6		Puukerrostalon rakentaminen	58
	6.1	Puukerrostalon rakennejärjestelmät	58
	6.1.1	Kantavat seinät	58
	6.1.2	Pilari-palkki.....	60
	6.2	Suurelementtitekniikka.....	61
	6.2.1	Perusteet	61
	6.2.2	Rakenteet.....	63
	6.2.3	Rajoitukset, edut ja haitat.....	63
	6.3	Tilaelementtitekniikka.....	66
	6.3.1	Perusteet	66
	6.3.2	Rakenteet.....	67
	6.3.3	Rajoitukset, edut ja haitat.....	68
	6.4	Pilari-palkkiteknikka	70
	6.4.1	Perusteet	70
	6.4.2	Rakenteet.....	72
	6.4.3	Rajoitukset, edut ja haitat.....	72
	6.5	Liittyvät rakenteet	74
	6.5.1	Parvekkeet	74
	6.5.2	Talotekniikka.....	75
	6.6	Puukerrostalomarkkinat.....	76
	6.6.1	Rakentamissopimukset.....	76

6.6.2	Puukerrostaloitoimittajat	77
7	Johtopäätökset.....	78
7.1	Yhteenveto.....	78
7.2	Turvallinen ja terveellinen puukerrostalo.....	79
7.2.1	Paloturvallisuus	79
7.2.2	Ääneneristys	79
7.2.3	Puurakenteiden suunnittelu	80
7.2.4	Kosteuden hallinta	81
7.3	Teollinen rakentaminen.....	81
7.4	Rakentamistekniikat	82
7.4.1	Yleistä	82
7.4.2	Suurelementti.....	82
7.4.3	Tilaelementti.....	83
7.4.4	Pilari-palkki	83
	Lähteet.....	85
	Liite 1: Haastattelut	
	Liite 2: Värähtely- ja taipumalaskut	
	Liite 3: Puukerrostalon rakennetyypit	

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Puukerrostalo	Tässä työssä puukerrostalolla tarkoitetaan yli kaksikerroksista rakennusta, jonka kantavat runkorakenteet ovat puuta ja joka koostuu vähintään kahdesta erillisestä asunnosta tai työpaikkatilasta.
Lean-rakentaminen	Lean-rakentaminen tarkoittaa teollista rakentamista, joka perustuu lean-toimintamalliin.
Lean	Lean on maailmalla laajasti käytössä oleva asiakaslähtöinen johtamis- ja kehittämisfilosofia.
Rakentamisprosessi	Rakentamisprosessi on kokonaisuus, johon kuuluu rakentaminen, rakennuksen suunnittelu ja rakentaminen.
Elementtitekniikka	Elementtitekniikka on rakennustekniikka, jossa talo kootaan työmaalla tehdasvalmisteisista valmisosista eli elementeistä.
Runko-PES	Runko-PES eli Runkopuuelementtisysteemi on avoin puutalojen elementtirakentamisen standardoitu järjestelmä.
Komposiittirakenne	Komposiittirakenne on yhdistelmä rakenne, jossa kaksi tai useampi eri materiaali toimii yhdessä kantavana ja jäykistävänä rakenteena.
Rakennejärjestelmä	Rakennejärjestelmä on rakennuksen tukiranka. Se vastaanottaa rakennuksen omasta painosta ja ulkoisista kuormista aiheutuvat pysty- ja vaakavoimat ja siirtää ne perustuksille.
Suurelementti	Suurelementti on nosturilla paikalleen asennettava yksittäinen tehtaalla koottu valmisosa.
Tilaelementti	Tilaelementti on rakennusosa, jolla on tilavuus eli se muodostaa tilan. Se muodostuu kantavasta rungosta ja sitä rajaavista pinnoista eli seinistä, lattiasta ja katosta.
Puukerrostalomarkkinat	Puukerrostalomarkkinat tarkoittaa puukerrostalojen hinnanmääräytymistä ostajan ja myyjän välillä.

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Puurakentamisella on Suomessa vahvat perinteet. Suurin osa pienimittakaavaisista rakennuksista on rakennettu aina puusta. Suuria monikerroksisia puurakennuksia ei ole ennen 1990-lukua rakennettu, koska paloturvallisuuden takia puun käyttö monikerroksisissa rakennuksissa on ollut rajoitettua säädöksiin 1850-luvulta lähtien. [1, s. 12]. Paloturvallisuustekniikoiden kehittymisen myötä puun käyttö ei ole enää kahteen vuosikymmeneen ollut paloturvallisuutta heikentävä tekijä.

Puurakentamisessa on tulevaisuus, koska puurakentaminen on ekologisesti ja kansantaloudellisesti kannattavaa. Puu on kevyt, energiatehokas sekä ympäristöystävällinen uusiutuva rakennusmateriaali, jota kasvaa metsissämme, joiden vuotuinen kasvu on huomattavasti suurempi kuin poistuma. Puurakentamisen suurin kasvupotentiaali on suurimittakaavaisessa kerrostalorakentamisessa. Puukerrostalorakentamista on kehitetty 1990-luvulta lähtien yhteistyössä EU-maiden kanssa, mutta Suomessa vallitsevan vanhan betonielementtirakentamiskulttuurin takia puukerrostalorakentaminen ei ole naapurimaistamme poiketen saanut jalansijaa. Puun markkinaosuus kerrostalorakentamisesta on tällä hetkellä vain yksi prosentti. [2]

Vasta viime vuosina maailmanlaajuisten ympäristönsuojelukysymysten merkityksen kasvaminen ja perinteisen puunjalostusteollisuuden siirtyminen ulkomaille ovat aiheuttaneet muutoksen kerrostalorakentamisessa. Valtiovalta on uusien palomääräysten myötä sallinut korkeiden puukerrostalojen rakentamisen, ja suuret metsäteollisuusyritykset ovat ottaneet kokonaisten puukerrostalojen rakentamisen osaksi liiketoimintaansa. Näiden panostusten aikaansaama muutos merkitsee puun käytön huomattavaa lisäämistä Suomen kerrostalorakentamisessa.

Tärkeimmät asiat puukerrostalorakentamisen kasvun ja kilpailukyvyn kannalta ovat turvalliset ja terveelliset rakenteet sekä kustannustehokas rakentaminen. Puukerrostalorakentamisen pitää olla vähintään yhtä kustannustehokasta kuin betonirakentamisen, ja rakenteiden pitää täyttää niille asetetut vaatimukset. Vain siten saadaan myös Suomessa toimivat rakennusliikkeet mukaan puukerrostalorakentamiseen.

Tehokas puukerrostalorakentaminen saavutetaan toimivien rakentamistekniikoiden ja teollisen rakentamisen kautta. Nykyaikaisen puukerrostalon työmaa-aika on lyhyt nopeiden rakentamistekniikoiden ansiosta. Tekniikat perustuvat teollisesti pitkälle esivalmistettuihin mittatarkkoihin elementteihin ja niiden välisiin standardisoituihin liitoksiin.

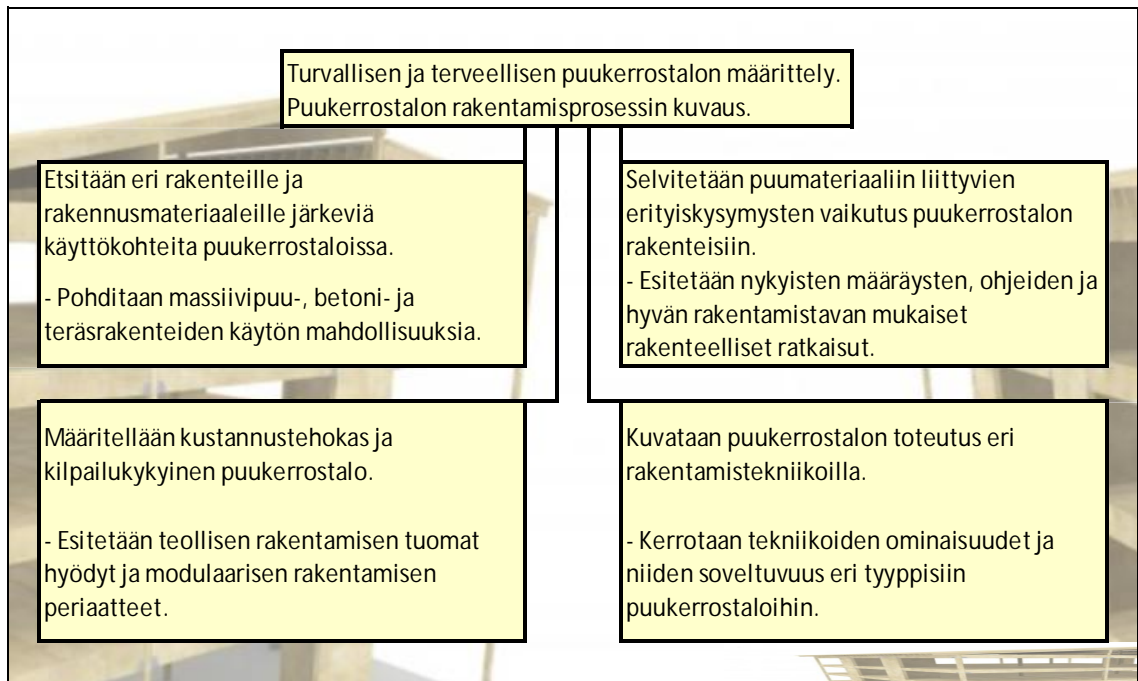
Puun ominaisuuksista johtuen se ei kuitenkaan sovellu kaikkiin rakenteisiin, joten puukerrostalot eivät ole koskaan puhtaita puutaloja. Siksi puun, betonin ja teräksen yh-

teistoiminnan kehittäminen on tärkeää. Betonia tarvitaan perusrakenteisiin ja teräsrakenteisiin.

1.2 Tutkimusongelma ja tavoitteet

Suomeen on rakennettu yhteensä noin neljäkymmentä puukerrostaloa ja nykyaikaisilla rakentamistekniikoilla vain muutama [3]. Perinteisten betonikerrostalojen rakentajat eivät tiedä, millaisia toimivat puukerrostalon rakenteet ovat, eikä heillä ole kokemuksen tuomaa tietotaitoa puukerrostalon rakentamisesta. NCC Rakennus Oy haluaa olla mukana puukerrostalorakentamisen kehityksessä ja tarvitsee siksi tietoa puukerrostalojen rakenteisiin ja rakentamiseen liittyvistä erityiskysymyksistä ja rakentamistekniikoista.

Tutkimuksen päätavoitteina on määrittää, millainen on turvallinen ja terveellinen puukerrostalo, sekä selvittää miten nykyaikainen kustannustehokas puukerrostalo rakennetaan Suomessa. Kuvassa 1.1. on esitetty tutkimuksen päätavoitteet ja niitä tukevat osatavoitteet.



Kuva 1.1. Tutkimuksen tavoitteet

Kuvassa ylempänä olevat osatavoitteet, jotka koskevat eri materiaalien käyttökohteiden etsimistä ja puurakentamisen erityiskysymyksiä, liittyvät turvallisten ja terveellisten rakenteiden määrittelyyn. Alempien osatavoitteiden kustannustehokas puukerrostalo ja toteutus eri rakentamistekniikoilla saavuttamisen kautta voidaan kuvata koko puukerrostalon rakentamisprosessi.

1.3 Rajaukset

Työ on tehty rakenneteknisestä näkökulmasta. Rakenteet käydään läpi niiden teknisten ominaisuuksien osalta. Rakentamista ja rakentamistekniikoita käsitellään rakenteel-

listen ominaisuuksien lisäksi myös rakennettavuuden ja kustannustehokkuuden näkökulmasta. Työssä käsitellään 3–8-kerroksisia P2-paloluokkaisia Suomen olosuhteisiin rakennettavia asuin- ja työpaikkarakennuksia, joiden kantavat rakenteet ovat puuta.

Turvallisten ja terveellisten rakenteiden tarkastelu sisältää kantavat, jäykistävät, eristävät ja osastoivat rakenteet. Muita rakenteita, kuten kevyitä itsensä kantavia huoneistojen sisäisiä seiniä tai julkisivurakenteita, käsitellään vain paloturvallisuuden osalta. Puukerrostalojen rakentamisosuus keskittyy nykyään Suomessa käytössä oleviin puukerrostalon rakentamistekniikoihin. Muita käytettyjä ja muualla käytössä olevia tekniikoita käsitellään pintapuolisesti puukerrostalojen historia -osuudessa.

1.4 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus on luonteeltaan kvalitatiivinen eli laadullinen. Siinä ei keskitytä yksittäisten, kokonaisuuden kannalta vähämerkityksellisten, puukerrostaloilmiöiden tutkimiseen, vaan selvitetään nykyaikaisen puukerrostalon rakenteita ja rakentamista kokonaisvaltaisesti.

Tutkimusstrategiana on vertaileva tapaustutkimus, joka kohdistuu harkinnanvaraisella otannalla valittuihin Suomessa rakennettuihin ja rakenteilla oleviin puukerrostaloihin. Aineistonhankintamenetelminä ovat avoin asiantuntijahaastattelu, havainnointi ja kirjallisuusselvitys.

Avoimiin asiantuntijahaastatteluihin on valittu Suomessa toimivia puukerrostalorakentajia sekä puu- ja puukerrostalorakentamisessa vaikuttavia asiantuntijoita. Kaikkien haastateltujen henkilöiden nimet on esitetty liitteessä 1. Havainnointimenetelmä perustuu kohdevierailuihin ja työmaakäynteihin.

1.5 Rakenne

Tutkimuksen teoriaosuus alkaa luvusta 2 yleisellä puukerrostalo-osuudella, jossa kerrotaan puukerrostalojen historiasta Suomessa ja maailmalla. Yleisen historiaosuuden jälkeen päästään työn ydinosuuteen. Se alkaa puun ja puukerrostalorakentamisen erityiskysymyksillä, joita ovat paloturvallisuuteen, ääneneritykseen, kosteuskestävyyteen ja rakennesuunnitteluun liittyvät asiat.

Työn toinen keskeinen osa on luvussa 4, jossa käydään läpi kustannustehokkaan ja muihin rakentamismateriaaleihin verrattuna kilpailukykyisen puukerrostalon rakentamista. Tehokkaan ja kilpailukykyisen puukerrostalon perusteita käydään läpi modulaarisuuden, tehokkaan teollisen esivalmistuksen ja rakennettavuuden näkökulmista. Tutkimuksen luvussa 5 mietitään lyhyesti betoni- ja teräsrakenteiden pakollisia ja mahdollisia käyttökohteita puukerrostaloissa.

Työn kolmas pääosuus ja varsinainen empiirinen osio käsittelee nykyaikaisen puukerrostalon rakentamistekniikoita, joita on olemassa kolme. Osuudessa käydään läpi erilaiset rakennejärjestelmät ja kuvataan rakentamisprosessi eri tekniikoilla. Lisäksi käydään pintapuolisesti läpi puukerrostalorakentajia ja rakentamissopimuksia. Lopuksi

tutkimuksen asiat kootaan yhteen. Viimeisessä luvussa tehdään johtopäätökset ja esitetään mahdolliset jatkotutkimustarpeet ja -toimenpiteet.

1.6 Samanaikaiset tutkimukset ja tuotokset

Työn kanssa tehdään samanaikaisesti toinen diplomityö, joka käsittelee puukerrostalojen rakentamista arkkitehtonisesta näkökulmasta. Siinä keskitytään tilaelementtirakenteisen puukerrostalon rakennussuunnitteluun, ympäristönsuojeluasioihin ja valmistuneiden puukerrostalojen arkkitehtonisiin ominaisuuksiin.

Tämän tutkimuksen kirjallisen tuotoksen lisäksi molempien diplomitöiden perusteella rakennetaan yhteinen taulukkopohjainen työkalu, joka ottaa kantaa asuinpuukerrostalojen rakentamiseen sekä rakenteellisiin ja arkkitehtonisiin asioihin. Työkalu määrittelee puukerrostalon ominaisuuksien mukaan suunnittelussa ja rakentamisessa huomioitavat reunaehdot ja erityisratkaisut, jotka tulee ottaa huomioon puukerrostalon rakentamisprosessissa.

2 PUUKERROSTALOJEN HISTORIA

2.1 Puurakentamisen historia

2.1.1 Kodasta kaupunkeihin

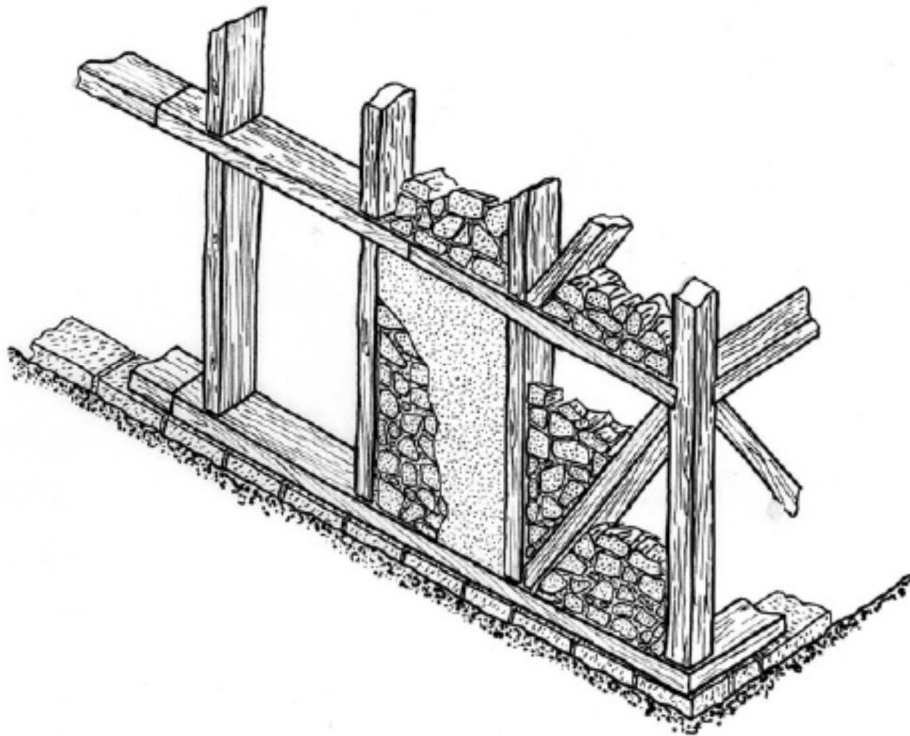
Ennen maatalouden kehittymistä varhaisella kivikaudella ihmiset elivät metsästä-mällä, kalastamalla ja keräämällä ravintoa metsistä. Pysyvää asutusta ei ollut, koska ihmiset liikkuivat ravinnon perässä. Väliaikaiset asutukset olivat pääasiassa puuriu'uista rakennettuja puolipyöreitä kotia, jotka verhoiltiin lehdillä, vuodilla tai tuohilla. [4, s. 9]

Varhaiskivikauden loppupuolella jääkauden päättymisen jälkeen noin 12 000 vuotta sitten maanviljely syntyi Lähi-idässä Välimeren rannikolla. Maanviljelyn keksimisen johdosta ihmiset alkoivat rakentaa pysyviä asutuksia peltajensa viereen. Puuntyöstötyökalut olivat tuolloin alkeellisia kivistä hakattuja sahoja, joiden avulla ensimmäiset, hirs-restä rakennetut, talot rakennettiin. Pysyvien puurakennusten yleistyessä Välimeren alueella kasvoi vielä tiheää metsää, josta saatiin rakennusmateriaalia hirsitaloihin, jotka rakennettiin tiiviiksi kyläyhteisöiksi. Näin syntyivät ensimmäiset kaupungit 10 000 vuotta sitten [4, s. 9].

2.1.2 Rankarakenteiden synty

Välimeren ilmaston muuttuminen ja metsien käyttö hirsirakentamiseen aiheuttivat eteläisellä Välimerellä metsien kuihtumista ja maan aavikoitumista noin 5 000 vuotta ennen ajanlaskun alkua. Metsien kuihtuminen yhdistettynä puuntyöstötyökalujen kehittymiseen sai muinaiset egyptiläiset kehittämään rakennustekniikan, jossa puuta käytettiin vain rankoina tarvittavissa osissa rakennetta ja puurankojen välit täytettiin muilla materiaaleilla, kuten punotuilla matoilla, oljilla, kivillä tai lankuilla. [4, s. 9]

Ensimmäiset rankarakenteiset talot tehtiin ristikkotyypisellä rankatekniikalla. Ristikkotyypinen rankarakentamistekniikka levisi Välimereltä Keski-Eurooppaan kaupungistumisen ja Antiikin Rooman laajenemisen myötä. [5, s. 25] Kuvassa 2.1. on Antiikin Roomassa kehitetyllä rankarakennetekniikalla rakennettu seinä.



Kuva 2.1. Antiikin Rooman *Opus craticium* -seinärakenne [6]

Antiikin Roomassa kehitetty ristikkomainen rankarakennetekniikka on nimeltään *Opus craticium*. *Opus craticium* -seinät olivat puuristikoita, joiden välit muurattiin umpeen savitiilillä. Välipohjissa käytettiin puupalkkeja ja lankkulattioita. Tekniikkaa pidetään myöhempien rankarakennetekniikoiden esi-isänä. [5, s. 25]

2.1.3 Suomen puurakentaminen

Rakennuskulttuuri levisi muun kehityksen tavoin Välimereltä pohjoiseen hitaasti. Hirsirakentamistekniikkaan on Suomessa siirrytty vasta noin 1000-luvulla. Suomen runsaasta puun saatavuudesta ja vähäisestä asukkaiden määrästä johtuen hirsirakentaminen säilyi pitkään pääasiallisena puurakentamistekniikkana. Parhaimpia hirsirakentamisen esimerkkejä ovat tähän päivään asti säilyneet suuret puukirkot. Vasta toisen maailmansodan jälkeinen rakentamisen teollistuminen ja nopea kaupungistuminen toivat rankarakenteet hirsien tilalle Suomen puurakentamisessa. [5, s. 28]

2.2 Puukerrostalojen kehitys

2.2.1 Kerroksellinen rakentaminen

Maatalouden kehittymisestä alkanut kaupungistuminen on suurin syy sille, että monikerroksisia rakennuksia on alettu rakentaa. Kaupungit kasvoivat Antiikin Rooman aikana nopeasti. Kaupunkirakennetta oli tiivistettävä, koska kaupungin pinta-alan kasvattaminen ei ollut järkevää välimatkojen pidentymisen ja heikomman puolustettavuuden vuoksi.

den takia. Rakennusten kerroslukua oli kasvatettava. Antiikin Roomassa rakennettiin ensimmäiset rankarakenteiset kerrostalot. [5, s. 25]

Rooman valtakunnan hajoamisen jälkeen puukerrostalojen rakentaminen unohtui pitkäksi aikaa. Puukerrostaloja alettiin rakentaa uudelleen vasta myöhäisellä keskiajalla 1500-luvulla. Myöhäiskeskiajan eurooppalaiset puukerrostalot rakennettiin erilaisilla ristikkorankarakennetekniikoilla, jotka perustuivat Opus craticium -tekniikkaan. [5, s. 25] Keskiaikaisista rankarakenteista tunnetuin on kuvan 2.2. Fachwerk-ristikkorakenne.



Kuva 2.2. Kolmikerroksinen Fachwerk-talo [7]

Kuvassa oleva saksalainen Fachwerk-tyylinen puukerrostalo on uudistettu vastamaan alkuperäistä rakennetta. Julkisivusta näkyy selvästi ruskea kantava ristikkoranka, jonka välit on muurattu ja rapattu. Fachwerk-tekniikan suurin ero Opus craticium -tekniikkaan on sen liitoksissa. Myöhäiskeskiajan liitostekniikat olivat metalliliittimien kehittymisen myötä parempia verrattuna vanhoihin roomalaisiin tekniikoihin. Saksassa ja Itävallassa rakennettiin 1500-luvulla jopa kuusikerroksisia puutaloja Fachwerk-tekniikalla [4, s. 10].

2.2.2 Nykyaikaisen puukerrostalon juurilla

1500-luvun jälkeen puurakentamisen painopiste siirtyi uudelle mantereelle. Eurooppalaiset kirvesmiehet veivät tietotaidon mukanaan Pohjois-Amerikkaan, jossa puuvarat olivat suuret ja väestön kasvaessa rakentamisen tarve lisääntyi kiihtyvää vauhtia. Pohjois-Amerikassa rakennettiin eurooppalaisen perinteen mukaisesti aina 1800-luvulle asti, jolloin kehitettiin uusi kantavat seinät -tyyppinen rakennejärjestelmä. Ensimmäinen 1832 syntynyt kantavat seinät -järjestelmä on balloon frame- eli niin sanottu pitkärunkojärjestelmä. Pitkärunkojärjestelmässä rakennuksen seinätolpat ovat koko rakennuksen

korkuisia. Järjestelmällä pystytään rakentamaan vain kaksikerroksisia taloja, ja se väistyi sen jälkeen, kun taloista piti tehdä korkeampia. [8]

Pitkärunkojärjestelmän tilalle tuli nykyisinkin käytössä oleva platform frame- eli kerrosrankarakennejärjestelmä. Järjestelmä perustuu kerroksen korkuisiin rankarakenteisiin kantaviin seiniin ja valmiiksi määrittäen katkottuihin pre-cut-puusiin, jotka tuodaan suoraan tehtaalta. Määrittäisistä puuosista kootaan työmaalla elementtejä, kuten seiniä ja välipohjia, jotka asennetaan paikoilleen. Platform frame -rakennusta tehdään kerros kerrallaan, jolloin välipohjat toimivat työtasoina seuraavan kerroksen rakentamiselle. Teollinen puurakentaminen syntyi, kun tällä järjestelmällä tehtiin ensimmäiset standardisoidut tyyppitalot Amerikassa 1880-luvulla. [8]

2.3 Suomen puukerrostalorakentaminen

2.3.1 Ensimmäiset puukerrostalot

Jo ennen rankarakennetekniikan tuloa toisen maailmansodan jälkeen puutalojen korkeutta oli rajoitettu Suomessa. Nämä rajoitukset perustuivat paloturvallisuusseikkoihin, joilla haluttiin estää kaupunkipaloja. Suomeen ei puurakentamisrajoituksista johtuen ole rakennettu yli kaksikerroksisia puukerrostaloja ennen 1990-lukua. [1]

Suomen hallitus halusi kansantalouden kasvun ja viennin edistämiseksi lisätä puun käyttöä 1990-luvun puolivälissä. Puurakentamisen kehittäminen nähtiin yhtenä tärkeimpänä osana tätä hanketta. Valtiovalta aloitti puurakentamisen teknologiaohjelman vuonna 1995. Ohjelman tarkoituksena oli kehittää puurakentamisen tasoa ja synnyttää uutta puurakentamisen liiketoimintaa, jota puukerrostalojen rakentaminen edusti. [8]

Suomen ensimmäiset kolme puukerrostalokohdetta valmistuivat vuosina 1996 ja 1997 Ylöjärvelle, Helsingin Viikkiin ja Ouluun. Ne olivat koerakennushankkeita, joiden tarkoituksena oli toteuttaa ominaisuuksiltaan korkeatasoisia sekä rakenteellisesti ja arkkitehtonisesti toimivia kokonaisuuksia. Rakennukset olivat korkeimmillaan neljäkerroksisia, ja ne rakennettiin poikkeusluvin, koska palomääräykset eivät sallineet yli kaksikerroksisia puurakennuksia vielä tuolloin. [8, 9]

Ylöjärvelle vuonna 1996 valmistuneet kerrostalot olivat 2–3-kerroksisia, ja ne rakennettiin pilari-palkkirungolla, jossa talon tukirangan muodostavat pitkät, rakennuksen korkuiset pilarit ja niiden väliin asennetut palkit. Välipohjat ja yläpohjat tehtiin palkkien väliin asennettavilla ripalaattaelementeillä. Kaikki rankarakenteiset seinät tehtiin kokonaan työmaalla. [9]

Viikin ja Oulun puukerrostalot toteutettiin Amerikkalaisen platform frame -järjestelmän periaatteiden mukaisesti. Molempien kohteiden seinärakenteet ovat kantavia ja jäykistäviä yhden kerroksen korkuisia rankarakenteita. Välipohja- ja yläpohjarakenteet ovat myös rankarakenteita. Viikin kerrostalot rakennettiin suurimmaksi osaksi elementeistä, jotka sisälsivät kantavien ja jäykistävien rakenteiden lisäksi myös lämmöneristyksen. Oulun kerrostaloissa vain välipohja ja osin yläpohja tehtiin elementeistä. Kaikki Oulun kohteen seinät tehtiin täysin platform frame -järjestelmän mukai-

sesti pre-cut-osista. Seinät koottiin tasojen päällä elementeiksi, jonka jälkeen ne nostettiin paikoilleen nosturilla tai miesvoimin. [9]

2.3.2 Nykyaikaiset puukerrostalot

Ensimmäisten puukerrostalojen rakentamisen jälkeen Suomessa on ennen vuotta 2010 rakennettu vain kymmenen puukerrostalokohdetta [3]. Vaikka ensimmäiset puukerrostalot täyttivät niille asetetut tekniset vaatimukset, ei puukerrostalorakentaminen saanut valtiovallan ponnisteluista huolimatta kunnolla tuulta siipiensä alle 1990-luvun lopussa.

Syynä tähän olivat ensimmäisten puukerrostalojen rakentamiskustannukset, jotka nousivat tietotaidon puutteen vuoksi korkeiksi. Teoriatasolla tiedettiin, millaisia rakenteita tulisi rakentaa. Ulkomailla käytetyistä puukerrostalojen rakentamistekniikoista osattiin ottaa mallia, ja betonirunkoisten kerrostalojen rakentaminen oli tuttua. Käytännön kokemusta puukerrostalon rakentamisesta Suomen sääolosuhteissa ei ollut.

Ulkomaisten puukerrostalojen ja betonikerrostalojen rakentamistekniikoiden matkiminen yhdistettynä kokemuksen puutteeseen johti siihen, että oikeisiin ratkaisuihin päästiin vasta kokeilujen ja harjoittelun kautta. Suurin yksittäinen syy kustannusten nousuun olivat Suomen sääolosuhteet, joita ei osattu ottaa huomioon.

Rakentamistekniikoiden kehittyminen yhdistettynä ympäristönsuojeluasioiden merkityksen kasvamiseen on avannut uusia ovia puukerrostalojen rakentamiselle vaativissa Suomen sääolosuhteissa. Näiden asioiden yhteisvaikutus lisättynä valtiovallan antamiin uusiin paloturvallisuusmääräyksiin on saanut Suomessa toimivat suuret puuteollisuusyritykset mukaan puukerrostalomarkkinoille. Pelkästään vuoden 2013 alussa Suomessa oli rakenteilla tai suunnitteilla reilusti yli 20 puukerrostalokohdetta [10]. Nykyaikainen suomalainen puukerrostalo on pitkälle tehtaassa esivalmistetuista valmisosista nopeasti rakennuspaikalla koottava kokonaisuus, joka on ominaisuuksiltaan kilpailukykyinen betonikerrostalon kanssa.

3 PUUKERROSTALORAKENTEIDEN ERITYISKYSYMYKSIÄ

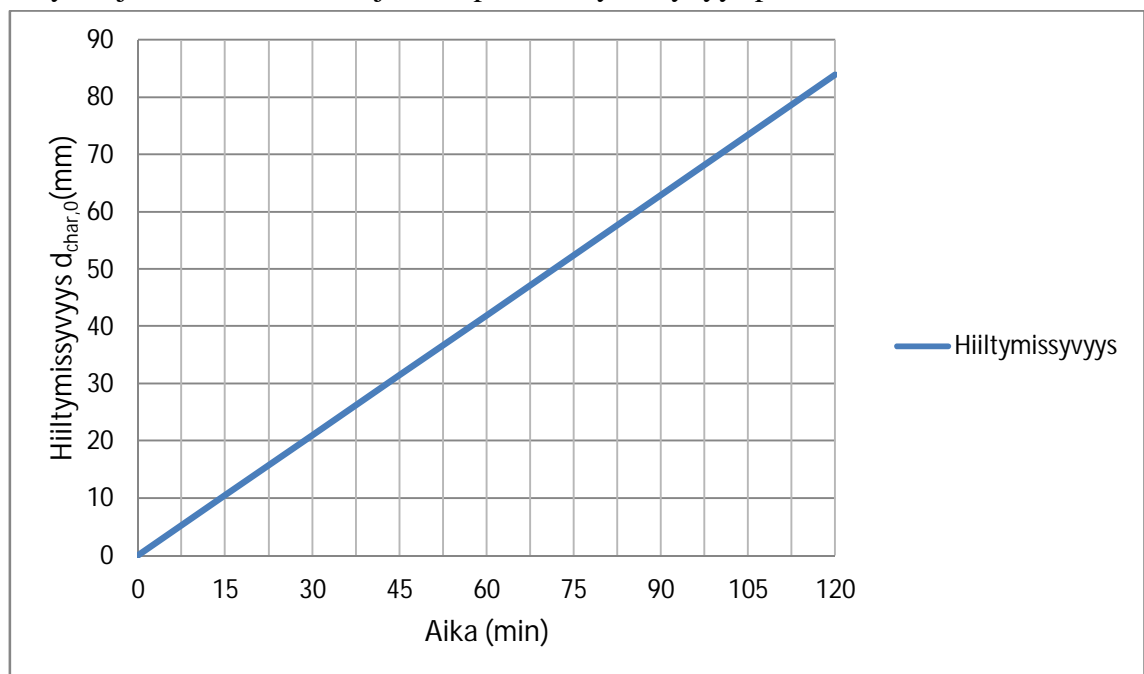
3.1 Paloturvallisuus

3.1.1 Puun palotekniset ominaisuudet

Puu on palava materiaali. Palotilanteessa lämpötilan noustessa 100 °C:seen puusta alkaa höyrystyä kemiallisesti sitoutunut vesi. Tällöin alkaa myös kostean puun pehmeneminen. Kuivan puun pehmeneminen alkaa noin 180 °C:ssa. Pehmeneminen saavuttaa maksiminsa 320–390 °C:n lämpötilassa. [4, s. 48, 11]

Puun syttymiseen vaikuttaa voimakkaasti aika, jona puu on lämmölle alttiina. Hapen saannin ollessa riittävä puu syttyy 15–20 minuutissa 180 °C:ssa. 430 °C:n lämpötilassa puu syttyy noin puolessa minuutissa. Syttymisherkkyys pienenee tiheyden lisääntyessä. [4, s. 48, 11]

Syttymisen jälkeen puu palaa hiiltymällä. Puun palamis- eli hiiltymisnopeus on puurakenteesta riippuen 0,55–1,00 millimetriä minuutissa [12, s. 24]. Kuvassa 3.1. on esitetty suojaamattoman liima- ja kertopuun hiiltymissyvyys palon kuluessa.



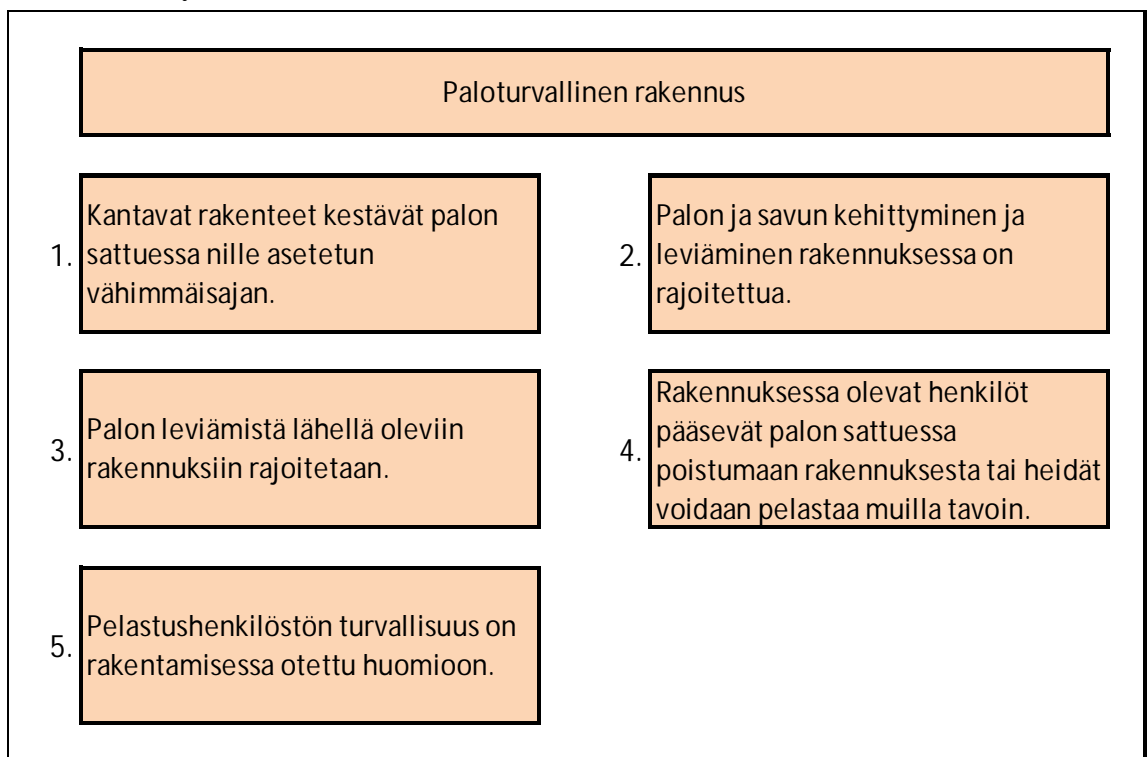
Kuva 3.1. Liima- ja kertopuun hiiltymissyvyys kappaleen pinnasta palon kuluessa

Suojaamattomalla liima- ja kertopuulla palamisnopeus on 0,7 millimetriä minuutissa. Kuvasta nähdään, että puun palamisnopeus on vakio eli hiiltymissyvyys on suoraan

verrannollinen paloaikaan. Palotilanteessa hiiltymättömän puun katsotaan olevan normaalitilassa lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiltaan. [12]

3.1.2 Paloturvallinen rakennus

Paloturvallisuus on rakennukselle asetettu olennainen vaatimus, jolla turvataan ihmiset ja omaisuus rakennuksessa tulipalon sattuessa. Se tarkoittaa kuvassa 3.2. olevien viiden osavaatimuksen toteutumista. Paloturvallisuusvaatimusten katsotaan täyttyvän, jos rakennus suunnitellaan ja rakennetaan noudattamalla Suomen Rakentamismääräyskokoelman osan E1 paloluokkia ja lukuarvoja. Paloturvallisuusvaatimus täyttyy myös, mikäli rakennuksen suunnittelu ja rakentaminen perustuu oletettuun palonkehitykseen, jossa otetaan huomioon rakennuksen ominaisuudet, käyttö ja rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet. [13, s. 8]



Kuva 3.2. Paloturvallisuusvaatimukset [13]

Kuvan viiden osavaatimuksen täytyminen varmistetaan palontorjunnalla, joka jaetaan passiiviseen ja aktiiviseen. Passiiviseen palontorjuntaan kuuluvat rakennuksen rakenteelliset ominaisuudet, joilla estetään rakenteiden syttyminen, säilytetään rakennuksen kantavuus, rajoitetaan palo osastoihin ja estetään palon leviäminen palo-osastosta, rajoitetaan palon kehittymistä, estetään palon leviäminen muihin rakennuksiin sekä varmistetaan ihmisten poistuminen palon sattuessa [14].

Aktiiviseen palontorjuntaan luetaan laitteet ja toiminnot, jotka varmistavat paloturvallisuuden palon sattuessa. Näitä ovat palovaroittimet ja automaattiset paloilmoittimet, savunpoisto, alkusammutus ja automaattiset sammutusjärjestelmät sekä palokunnan toiminta [14].

Puurakenteet osallistuvat paloon, toisin kuin perinteiset kerrostalojen betoni- ja teräsrakenteet. Rakenteellisen kantavuuden säilyttäminen palossa ei silti ole puurakenteilla suuri ongelma, koska puu palaa hitaasti ja syntyvä hiilikerros suojaa sisempää puuta palolta. Puukerrostaloihin liittyvä suurin palotekninen erityiskysymys on passiiviseen palontorjuntaan kuuluva rakenteiden syttymisen estäminen. Se tarkoittaa käytännössä sitä, että kaikki puurakenteet on suojattava erillisellä palamattomalla palonsuojakerroksella.

3.1.3 Palomääräysten historia

Kaupungit koostuivat Suomessa vielä 1800-luvun alkupuoliskolla enimmäkseen yksikerroksisista, tiiviisti toistensa viereen rakennetuista puutaloista ja julkisia kivisiä rakennuksia oli vain harvakseltaan kaupunkien keskustoissa. Kaupungit olivat yleisilmeeltään yksitoikkoisia, ja usein toistuneet tulipalot levisivät helposti ja tuhosivat suuriakin alueita kerrallaan. [1, s. 11] Esimerkiksi Turku on palanut historiansa saatossa yli 30 kertaa, joista suurimpana on Turun palo vuonna 1827, joka tuhosi kolme neljäsosaa koko kaupungista.

1800-luvun alun jälkeen kaupunkeja pyrittiin kehittämään edustavammiksi ja ennen kaikkea paloturvallisemmiksi. Ensimmäisen empirekaavan laati palon raunioittamaan Turkuun vuonna 1828 Carl Ludvig Engel [1, s. 11]. Empirekaava on ruutukaava, jossa rakennukset on sijoiteltu väljästi ja kortteleita erottavat leveät kadut, jotka toimivat tehokkaina palokatkoina kortteleiden välissä.

Ensimmäisenä palomääräyksenä voidaan pitää vuoden 1856 yleistä rakennussääntöä, joka jakoi kaupungit luokkiin, joiden perusteella kaupunkien keskeiset osat oli rakennettava kivistä. Rakennussäännöllä suosittiin muutenkin merkittävästi kivitalojen rakentamista, sillä niiden korkeutta ei rajoitettu ja rakennusoikeus oli puutaloja suurempi. Ennen toista maailmansotaa vuonna 1936 rakennukset jaettiin sisäasiainministeriön päätöksellä ensimmäistä kertaa paloluokkiin. Paloluokkia oli neljä, ja eri luokkiin kuuluvien rakennusten rakenteille annettiin yksityiskohtaisia vaatimuksia. [1]

Paloluokkien rinnalle tuli vuonna 1962 annetun palonkestävyyspäätöksen myötä palokuorman ja palonkestoajan käsitteet. Uusien käsitteiden johdosta palorasitus pystyttiin ottamaan paremmin huomioon kantavien ja osastoivien rakennusosien suunnittelussa. Uloskäytäviä koskeva päätös tuli kaksi vuotta palonkestävyyspäätöksen jälkeen. Ensimmäisen kerran kaikki paloturvallisuuteen liittyvät päätökset koottiin yhteen vuonna 1976, jolloin ilmestyi Suomen ensimmäinen rakentamismääräyskokoelma. Kokoelman osa E1 oli entisten palomääräysten yhtenäistetty ja hienosäädetty versio, jossa kiellettiin puun käyttäminen yli kaksikerroksisten rakennusten runkomateriaalina. [1]

Rakennusten paloturvallisuusmääräyksiä on päivitetty vuoden 1976 jälkeen useita kertoja. Yli kaksikerroksinen puurakentaminen sallittiin ilman poikkeuslupaa vasta vuoden 1997 palomääräyksissä, jotka sallivat neljäkerroksisen asuin- tai työpaikkapuukerrostalon rakentamisen edellyttäen, että niihin asennetaan automaattinen sammutuslaitteisto. Uusin Rakentamismääräyskokoelman paloturvallisuusosa E1 astui voimaan vuonna 2011. Uudet määräykset asettavat edellisten määräysten tapaan tiukkoja rajoi-

tuksia puurakenteisten kerrostalojen palontorjunnalle, mutta sallivat kahdeksankerroksisten puukerrostalojen rakentamisen.

3.1.4 Nykyiset palomääräykset

Nykyisten vuonna 2011 voimaan tulleiden palomääräysten mukaan rakennukset jaetaan kolmeen paloluokkaan: P1, P2 ja P3. P1-luokkaan kuuluvat rakennukset, joiden kantavat rakenteet kestävät pääsääntöisesti palossa sortumatta. P2-luokan rakennuksen kantavien rakenteiden vaatimukset ovat P1-tasoa matalampia, mutta riittävä turvallisuustaso saavutetaan asettamalla erityisiä vaatimuksia pintaosien ominaisuuksille ja paloturvallisuutta parantaville laitteille. P2-luokan rakennuksen kokoa ja käyttötapaa on rajoitettu. P3-luokan kantaville rakenteille ei ole asetettu erityisvaatimuksia, ja vaadittu turvallisuustaso saavutetaan rajoittamalla rakennuksen kokoa ja käyttötarkoitusta. [13]

Taulukossa 3.1. on esitetty rakennuksen maksimikerrosluku ja puun käytön mahdollisuus runkomateriaalina eri paloluokissa. P1-paloluokan kerroslukua ei ole rajoitettu. P2-luokkainen rakennus voidaan tehdä yleensä enintään kaksikerroksiseksi, mutta asuin- ja työpaikkarakennukset voivat olla kahdeksankerroksisia. P3-luokan rakennus ei voi olla yli kaksikerroksinen. [13]

Taulukko 3.1. Rakennuksen maksimikerrosluku eri paloluokissa [13]

Paloluokka	Kerrosluku		
	1–2	3–8	Yli 8
P1	kyllä	ei	ei
P2	kyllä	kyllä*	
P3	kyllä		
	= rakentaminen sallittu		
	= rakentaminen ei ole sallittua		
kyllä/ei	= voiko rakennuksen runko olla puusta		
*vain asuin- ja työpaikkarakennukset			

Puuta voidaan käyttää runkomateriaalina P2- ja P3-paloluokissa sekä alle kolmikerroksisissa rakennuksissa myös P1-paloluokassa. Puuta on mahdollista käyttää kerrostalon runkorakenteena vain asuin- ja työpaikkarakennuksessa, jonka kerrosluku on alle yhdeksän. Puukerrostalon paloluokka on P2. [13]

Rakennusten tavoin myös yksittäiset rakennusmateriaalit jaetaan paloluokkiin. Paloluokkamerkintä kertoo materiaalin palavuudesta eli sen osallistumisesta paloon. Testattujen materiaalien paloluokkia kuvataan merkinnöillä A1, A2, B, C, D tai E. Testaamattomat rakennusmateriaalit kuuluvat luokkaan F. Paloluokan lisäksi eri materiaalin tulipalon aikaisia ominaisuuksia ilmaistaan lisämääreillä, jotka kertovat savuntuotosta ja palavien pisaroiden tuotosta. Taulukossa 3.2. on kerrottu testattujen rakennusmateriaalien paloluokkamerkinnät lisämääreineen ja esimerkkejä eri rakennusmateriaalien paloluokista. [13]

Taulukko 3.2. Testattujen rakennusmateriaalien paloluokat [13, 15]

A1	A2	B	C	D	E
Kivi	Kipsilevyt	Kipsilevyt	Palosuojattu puu	Puutuotteet yleensä	Huokoinen puukuitulevy
Betoni	Sementtikuitulevyt	Palosuojattu puu			
Lasi					
Teräs					
A1 = Ei osallistu paloon	A2 = Osallistuu paloon erittäin rajoitetusti	B = Osallistuu paloon hyvin rajoitetusti	C = Osallistuu paloon rajoitetusti	D = Osallistuminen paloon on hyväksyttävissä	E = Käyttäytyminen palossa on hyväksyttävissä
s1 = Savuntuotto on erittäin vähäistä	s2 = Savuntuotto on vähäistä	s3 = Ei täytä s1- eikä s2-vaatimuksia	d0 = Palavia pisaroita ei esiinny	d1 = Palavat pisarat tai osat sammuvat nopeasti	d2 = Ei täytä d0- eikä d1-vaatimuksia

Luokkiin A1 ja A2 kuuluvat materiaalit ovat niin sanottuja palamattomia materiaaleja. Puukerrostaloissa yleisesti käytettyjen kipsikartonkilevyjen paloluokka on A2-s1 d0. Palonsuojatun puun luokka on yleisesti B-s2 d0 ja puutuotteiden yleinen luokka on D-s2 d2. [13]

Puukerrostalon kantaville ja osastoiville rakenteille on asetettu kantavuuden, tiiviyden ja eristävyyden osalta erityisiä vaatimuksia, joita kuvataan kirjaimilla R, E ja I. Taulukossa 3.3. on kerrottu puukerrostalon rakenteisiin kohdistuvat vaatimukset eri palokuormilla. Palokuorma tarkoittaa palossa vapautuvaa kokonaislämpö määrää, kun palotilassa oleva aine, johon luetaan rakennusosat ja irtaimisto, palaa täydellisesti. [13] Kiuvan puun tehollinen lämpöarvo on noin 19 MJ/kg [16], jolloin 600MJ/m²:n palokuorma on sama kuin 32 kilogrammaa puuta palaisi neliömetrillä.

Taulukko 3.3. *Kantavien ja osastoivien rakenteiden luokat puukerrostalossa [13]*

Rakennusosa	Kantavat rakenteet	Osastoivat rakenteet	Osiin jakavat rakenteet
Ullakko			
Palokuorma*			
- alle 600 MJ/m ²	R60	EI30	EI15
- 600–1200 MJ/m ²	R120	EI30	EI15
- yli 1200 MJ/m ²	R180	EI30	EI15
Kerrokset			
Palokuorma*			
- alle 600 MJ/m ²	R60	EI60	EI15
- 600–1200 MJ/m ²	R120	EI90	EI15
- yli 1200 MJ/m ²	R180	EI120	EI15
Kellari			
Palokuorma*			
- alle 600 MJ/m ²	R60	EI60	EI15
- 600–1200 MJ/m ²	R120	EI90	EI15
- yli 1200 MJ/m ²	R180	EI120	EI15
Porrassyöksyt ja -tasanteet			
Palokuorma*			
- alle 600 MJ/m ²	R30		
- yli 600MJ/m ²	R60		
	= Rakennuksen eristeiden ja muiden täytteiden on oltava A2-s1 d0 -luokan materiaalia.		
	= Rakenteet on tehtävä A2-s1 d0 -luokan rakennusmateriaaleista.		
*Palokuorman arvo asuin- ja työpaikkarakennuksissa on tavallisesti alle 600 MJ/m2.			
R	= Kantavuus		
E	= Tiiviys		
I	= Eristävyys		

Taulukon R-, E- ja I-kirjaimilla kuvattavien vaatimusten jälkeen oleva numero tarkoittaa palonkestävyysaikaa minuutteina. Asuin- ja työpaikkarakennusten tavallisella alle 600 MJ/m²:n palokuormalla kantavien ja osastoivien rakenteiden vaatimus kantavuuden, tiiviyn ja eristävyyden osalta on 60 minuuttia ullakkoa lukuun ottamatta. Puukerrostalon kantavat ja osastoivat kellarirakenteet on tehtävä palamattomista materiaaleista. Porrassyöksyjen ja porrastasanteiden täytyy olla vähintään R30-luokkaa. Lisäksi kantavien puurakenteiden käytölle on asetettu lisävaatimus, jonka mukaan kantavissa rakenteissa olevien eristeiden ja muiden täytteiden pitää olla palamatonta materiaalia. [13]

Puukerrostalojen kantavien, osastoivien ja kevyiden puurakenteiden syttymisen estämiseksi ne on suojaverhoitava palamattomilla materiaaleilla. Suojaverhouksen luokka koostuu taulukossa 3.2. mainituista rakennusmateriaalin luokista ja erillisestä aikaluokasta. Aikaluokka kertoo verhouksen suojausajan. Suomessa on käytössä aikaluokat K₂10 ja K₂30, joista ensimmäinen on 10 minuutin ja toinen 30 minuutin suojaverhous.

Puurakenteisten ulko- ja sisäpuolisten sekä uloskäytävien suojaverhousien luokat kerrostaloissa ovat taulukon 3.4. mukaiset. [13]

Taulukko 3.4. Puukerrostalon puurakenteiden suojaverhousien luokat [13]

Kerrosluke		3–4	5–8
Sisäpuoli			
Lattiat		Ei vaatimusta	K ₂ 30, A2-s1 d0
Seinät ja katto		K ₂ 10, A2-s1 d0	K ₂ 30, A2-s1 d0
Ei kantavat/osastoivat väliseinät		K ₂ 10, A2-s1 d0	Ei vaatimusta
Ulkopuoli			
Ulkoseinän ulkopinta tai tuuletusrakoon rajoittuva pinta		K ₂ 10, A2-s1 d0	K ₂ 30, A2-s1 d0 tai K ₂ 10 A2-s1 d0, kun julkisivu on väh. B-s2 d0
Parvekkeet		K ₂ 10, A2-s1 d0	K ₂ 30, A2-s1 d0
Uloskäytävät			
Portaiden yläpinta		Ei vaatimusta	
Muut pinnat		K ₂ 30, A2-s1 d0	
K ₂ 10	= 10 minuutin eristävyys		
K ₂ 30	= 30 minuutin eristävyys		

3–4-kerroksisten puukerrostalojen suojaverhoukset ovat sisä- ja ulkopinnoissa pääsääntöisesti 10 minuutin luokkaa ja 5–8-kerroksisten 30 minuutin luokkaa. Poikkeuksena ovat 3–4-kerroksisten rakennusten lattiat ja 5–8-kerroksisten talojen kevyet väliseinät. Uloskäytävän suojaverhousvaatimukset ovat samat kaikilla puukerrostaloilla. [13]

Voimassa olevien palomääräysten mukaan parvekkeen kantavien rakenteiden suojaverhouksissa noudatetaan ulkopinnalle ja tuuletusraon sisäpinnalle asetettuja vaatimuksia. Parvekkeet olisi siten suojaverhoitava muiden ulkopuolisten rakenteiden tapaan taulukon 3.4. esittämällä tavalla palamattomilla materiaaleilla. Suojaverhousmateriaalina on nykyään käytännössä aina kipsilevy, joka ei sovellu säälle alttiisiin ulkotiloihin. Siksi määräyksiä voidaan soveltaa siten, että parvekkeet varustetaan automaattisella sammutusjärjestelmällä ja parvekkeiden kantavat puurakenteet ovat palosuojattua puuta. [13]

Rakenteiden suojaverhousvaatimusten lisäksi puukerrostalojen sisä- ja ulkopuolisille pintarakenteille on asetettu vaatimuksia. Pintarakenteilla tarkoitetaan sisäverhouksia ja julkisivurakenteita. Pintarakenteiden luokkavaatimukset ovat kerrosluvusta riippumattomia ja ne on esitetty taulukossa 3.5.

Taulukko 3.5. Pintojen luokkavaatimukset [13]

Sisäpuoli	
Seinät ja katot	B-s2 d0*
Lattiat	Ei vaatimusta
Ulkopuoli	
Tuuletusraon ulkopinta	B-s2 d0**
Tuuletusraoillisen ulkoseinän ulkopinta	B-s2 d0**
*Voidaan käyttää luokan D-s2 d2 rakennustarvikkeita, kun tila on varustettu tarkoitukseen sopivalla sammutuslaitteistolla.	
**Voidaan käyttää luokan D-s2 d2 rakennustarvikkeita seuraavin ehdoin muissa kuin ensimmäisessä kerroksessa:	
- palon leviäminen tuuletusraossa on rajoitettu kerroksittain	
- palon leviäminen vaakasuunnassa porrashuoneen ulkoseinän tuuletusrakoon on estetty	
- palon leviäminen julkisivusta ullakkoon ja yläpohjaan on estetty EI30-rakenteella	
- julkisivurakenteen laajojen alueiden putoaminen palossa on estetty	
- muut rakennukset ovat yli kahdeksan metrin etäisyydellä julkisivusta, jollei palon leviämistä julkisivuun ole estetty	

Puukerrostalon lattiapinnoilla ei ole paloluokkavaatimusta. Seinät ja katot voivat olla puuta, mikäli puukerrostalo on varustettu riittävän tehokkaalla sammutuslaitteistolla. Julkisivu voi olla palosuojaamatonta puuta vain, mikäli rakenteessa on tuuletusrako ja taulukossa esitetyt vaatimukset toteutuvat. Vaatimuksista olennaisimpia ovat palon leviämisen estäminen tuuletusraossa sekä leviämisen estäminen ullakkoon ja yläpohjaan. Näiden vaatimusten toteutuminen tarkoittaa kerroksellisten palokatkojen asentamista ja paloräystäiden rakentamista. Ensimmäisen kerroksen julkisivu ei voi olla palosuojaamatonta puuta. [13]

Puukerrostalojen muut rajoitukset liittyvät sen kokoon ja palomuriin. Palomuri on seinä, joka määrätyn ajan estää palon leviämisen ja kestää palotilanteessa sille rakenteiden sortumisesta tulevat iskut. Korkeutta, kerrosalaa ja palo-osaston kokoa koskevat rajoitukset on esitetty taulukossa 3.6. [13]

Taulukko 3.6. Puukerrostalon kokorajoitukset [13]

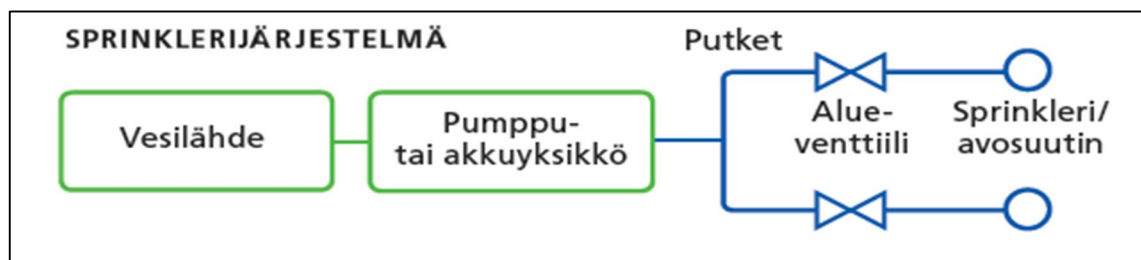
Kerrosluvu	3–4		5–8	
Käyttötapa	Asunto	Työpaikka	Asunto	Työpaikka
Korkeus (m)	14		26	
Kerrosala (m ²)	12 000*			
Henkilömäärä (kpl)	Ei rajoitusta			
Palo-osaston koko				
- ullakko	1 600 m ² jaettuna enintään 400 m ² osiin			
- kerrokset	Huoneisto	2 400 m ²	Huoneisto	2 400 m ²
- kellari	800 m ²			
*Voidaan sallia suurempana, jos rakennuksessa on automaattinen paloilmoitin tai automaattinen savunpoistolaitteisto.				

Henkilömäärälle ei ole asetettu rajoituksia. Kerrosalallakaan ei ole rajoitusta, mikäli rakennuksessa on automaattinen paloilmoitin ja automaattinen savunpoistolaitteisto. Taulukossa olevien palo-osaston kokovaatimusten lisäksi porrashuoneen on aina oltava oma palo-osastonsa. Jos puukerrostalo rakennetaan lähelle toista rakennusta, on sillä voimassa samat palomuurivaatimukset kuin P1-luokan rakennuksilla. Asuin- ja työpaikkarakennusten tavallisella palokuormalla vaatimus on EI-M120, joka tarkoittaa 120 minuutin tiivistä, eristävää ja iskunkestävää rakennetta. [13]

3.1.5 Automaattinen sammutuslaitteisto

Puukerrostaloihin on nykymääräysten mukaan aina asennettava automaattinen sammutuslaitteisto. [13, s. 36] Automaattinen sammutuslaitteisto aktivoituu palon sattuessa lämmön tai savun vaikutuksesta. Sen tarkoituksena on sammuttaa tulipalo alkuvaiheeseen tai pitää palo hallinnassa kunnes lopullinen sammutus suoritetaan muilla menetelmillä. [17, s. 15] Automaattinen sammutus voidaan toteuttaa vesi-, jauhe-, vaahto-, tai kaasujärjestelmällä. Kaasujärjestelmät sopivat kone- ja sähkötiloihin, joissa vesipohjaisia järjestelmiä ei voida käyttää. Vesipohjaiset järjestelmät sopivat asuin- ja toimistorakennuksiin.

Puukerrostaloissa käytetään automaattista sprinklerijärjestelmää, joka on vesipohjainen automaattinen sammutus- ja palonilmoitinjärjestelmä. Järjestelmä aktivoituu tietystä lämpötilassa, jolloin se hälyttää ennalta määrättyyn paikkaan ja aloittaa palon sammuttamisen. Sprinklerilaitteisto koostuu yhdestä tai useammasta vesilähteestä ja -pumpusta sekä useista sprinkleriasennuksista (kuva 3.3.). Sprinklerit laukeavat aina suutinkohtaisesti ja niiden lukumäärä mitoitetaan aina kohdekohtaisesti. Sprinklerit asennetaan suojattavan tilan kattoon. [17]



Kuva 3.3. Sprinklerijärjestelmäkaavio[18]

Perinteisen sprinklerijärjestelmän teho perustuu suureen veden määrään, joka kastaava palavan materiaalin. Tulipalon sattuessa sprinklerisuuttimista tuleva vesi saattaa valua muihin palamattomiin rakennuksen osiin kastaen rakenteita suurelta alueelta. Puu kestää huonosti kosteutta, joten puukerrostaloissa perinteisten sprinklerijärjestelmien käyttö ei ole suotavaa.

Vaihtoehtona perinteiselle sprinklerijärjestelmälle on vesisumujärjestelmä. Vesisumujärjestelmä käyttää vain noin kymmenesosan tavallisen sprinklerijärjestelmän vesimäärästä, joten rakennuksen mahdolliset tulipalon jälkeiset kosteusvauriot jäävät pieniksi. Vesisumujärjestelmän teho perustuu huonetilan jäähdytykseen, hapen syrjäyttämiseen ja lämpösäteilyn katkaisuun. Hapen syrjäyttäminen perustuu siihen, että sumu

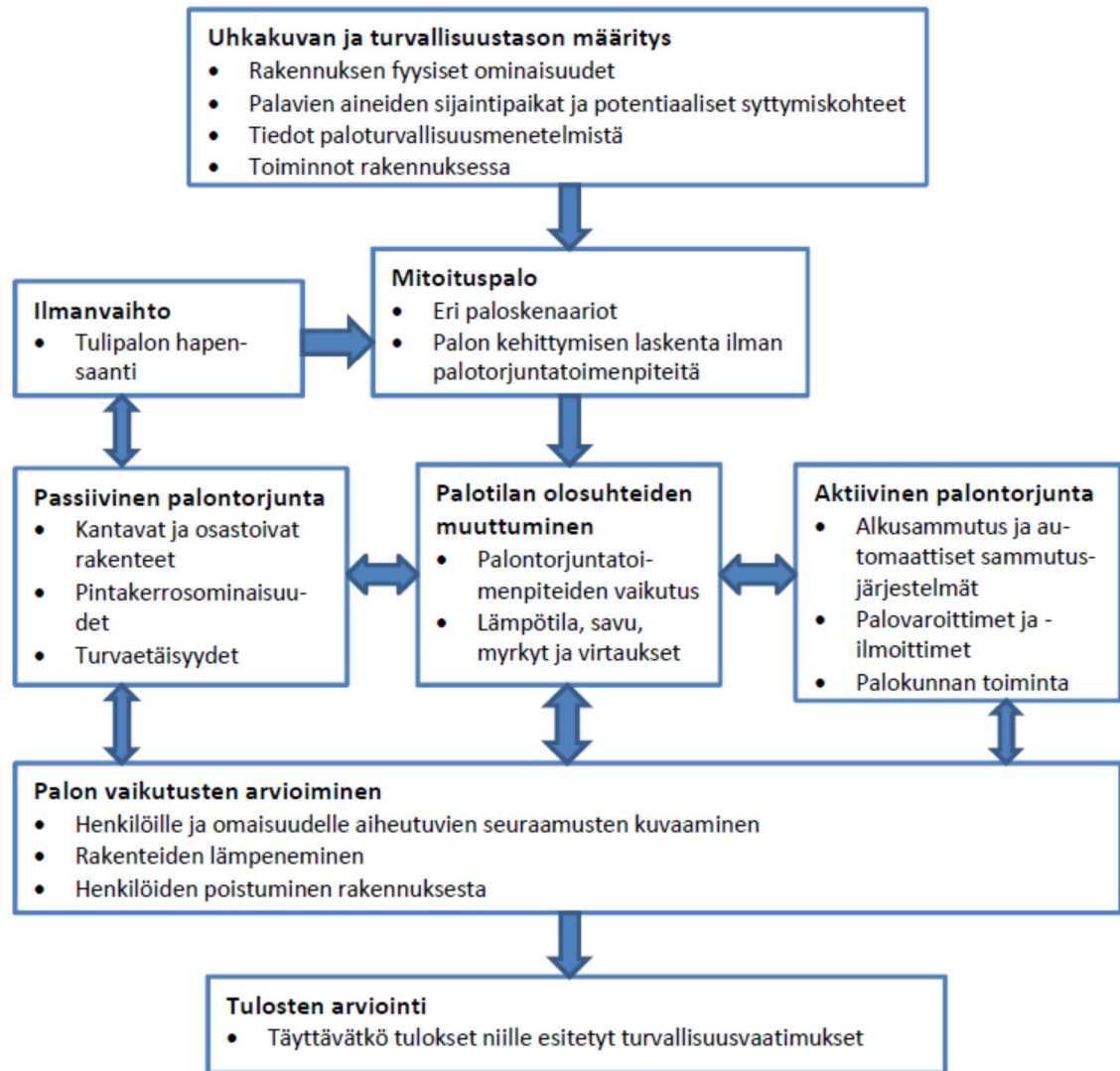
leviää palavaan tilaan nopeasti kattoa myöden. Jäähdytys- ja lämpösäteilyn katkaisuteho johtuu vesisumupisaroiden pienestä koosta. Pienten vesipisaroiden yhteispinta-ala on paljon suurempi suuriin pisaroihin verrattuna, vaikka vesimäärä olisi sama. Sen takia pienet mikropisarot absorboivat lämpöä todella tehokkaasti. Vesisumu saadaan aikaiseksi erityisten suuttimien ja korkean vedenpaineen avulla. [19]

Vesisumujärjestelmän lisäetuna ovat sen komponenttien pienet dimensiot. Pumppuyksiköt ja suuttimiin johtavat vesiputket ovat paljon pienempiä perinteiseen järjestelmään verrattuna. Putket voidaan sijoittaa rakenteisiin ilman ylimääräisiä alakattorakenteita, ja korkeissa rakennuksissa ei tarvita ylimääräisiä välipumppaamoita veden saamiseksi ylimpiin kerroksiin. Vesisumujärjestelmä on kuitenkin tavallista järjestelmää kalliimpi. Sen käyttö ei ole välttämättä kustannustehokasta yksittäisissä puukerrostaloissa. Suurissa korttelikohtaisissa järjestelmissä se on kuitenkin kustannuksiltaan jopa pienempi kuin tavallinen sprinklerijärjestelmä.

3.1.6 Toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu

Oletettuun palonkehitykseen perustuva paloturvallisuussuunnittelu eli toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu on yksityiskohtaista paloturvallisuussuunnittelua, joka kattaa kyseessä olevassa rakennuksessa suurella todennäköisyydellä esiintyvät tilanteet. Toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu on vaihtoehto niin sanotulle taulukkosuunnittelulle eli edellisissä kohdissa esitettyjen taulukoiden ja lukuarvojen käytölle. [13]

Toiminnallisen suunnittelun tekee aina erillinen paloturvallisuussuunnittelija. Suunnitelmissa tulee ottaa huomioon rakennuksen ja sen käytön yksityiskohtaiset ominaisuudet, paloturvallisuusmenetelmät, eri paloskenaariot, palontorjuntatoimenpiteiden vaikutukset sekä henkilö- ja omaisuusvahinkojen seuraamukset. Kuvassa 3.4. on yksinkertaistettu toiminnallisen paloturvallisuussuunnittelun kulku. [14]



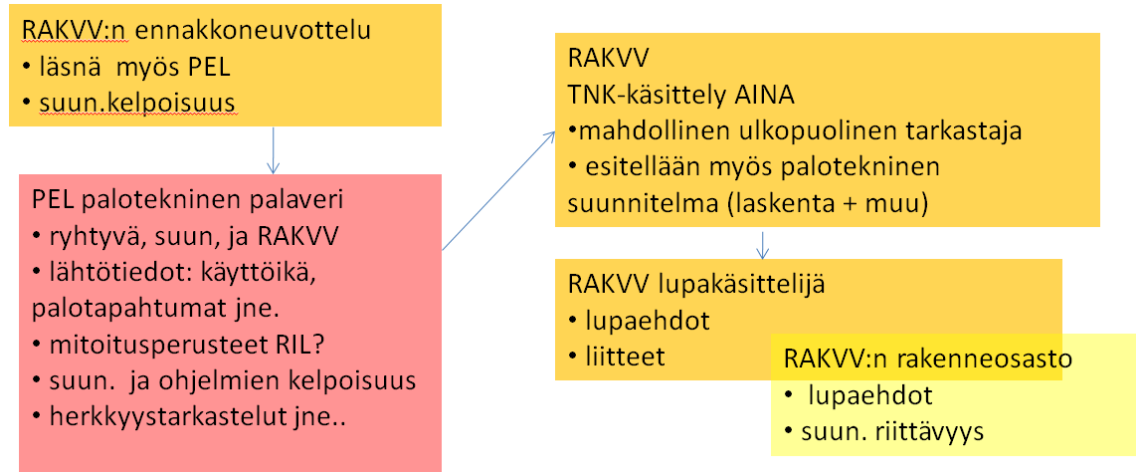
Kuva 3.4. Toiminnallisen paloturvallisuussuunnittelun kulku [14]

Suunnittelu alkaa uhkakuvan ja turvallisuustason määrittelyllä. Seuraavaksi muodostetaan eri paloskenaariot, joihin vaikuttavat passiiviset palontorjuntatoimenpiteet ja ilmanvaihto. Tämän jälkeen lasketaan palotilan olosuhteiden muutokset ottaen huomioon aktiiviset palontorjuntatoimenpiteet. Lopuksi arvioidaan palotilan olosuhdemuutosten vaikutukset henkilöille ja omaisuudelle. Saadut tulokset arvioidaan ja niitä verrataan asetetun turvallisuustason mukaisiin lähtöarvoihin. [14]

Toiminnallista paloturvallisuussuunnittelua on käytetty viime vuosina valmistuneissa puukerrostaloissa, ja nykyisten palomääräysten ollessa voimassa sitä tullaan myös tulevaisuudessa käyttämään. Sillä on mahdollista vaikuttaa muun muassa puukerrostalorakenteiden suojaverhouksiin ja pintamateriaaleihin. Esimerkiksi kantavien rakenteiden suojaverhoustarvetta voidaan mahdollisesti pienentää, jolloin kantavia puurakenteita, kuten massiivisia seiniä tai porrassyökyjä, voidaan jättää ainakin osin näkyviin. Jopa puukerrostalon paloluokan nostaminen luokkaan P1 on mahdollista, kun toiminnallisella suunnittelulla todistetaan riittävä paloturvallisuustaso.

Suomen rakennusvalvonta- ja paloviranomaisten suhtautuminen toiminnalliseen paloturvallisuussuunnitteluun vaihtelee hyvin paljon kunnittain. Helsingissä toiminnallista

paloturvallisuussuunnittelua on käytetty paljon. Yleisimpiä käyttökohteita ovat olleet suurten rakennusten osittaiset paloturvallisuusasiat, joita ei pysty toteuttamaan järkevästi taulukkosuunnittelulla. Sellaisia ovat esimerkiksi palo-osastojen kokojen tai savunpoiston mitoitus. Helsingissä puukerrostalojen toiminnalliseen paloturvallisuussuunnitteluun suhtaudutaan avoimesti ja sitä on käytetty eri puukerrostalokohteissa. Toiminnallisen paloturvallisuussuunnittelun eteneminen Helsingin rakennusvalvontavirastossa rakennuslupaa haettaessa on esitetty kuvassa 3.5.



Kuva 3.5. Toiminnallisen paloturvallisuussuunnittelun eteneminen Helsingin rakennusvalvonnassa [20]

Helsingissä paloturvallisuussuunnittelun hyväksyminen alkaa rakennusvalvonnan ja pelastusviranomaisen ennakkoneuvottelulla. Sen jälkeen pidetään palotekninen palaveri, johon osallistuu viranomaisten lisäksi myös paloturvallisuussuunnittelija. Paloteknisessä palaverissa hyväksytyjen reunaehtojen hyväksymisen jälkeen alkaa kuvassa 3.4. esitetty paloturvallisuussuunnittelu. Suunnitelmien valmistuttua ne käsitellään Teknisessä neuvottelukunnassa. Vasta TNK:n hyväksynnän jälkeen toiminnalliset paloturvallisuussuunnitelmat menevät rakennuslupakäsittelyyn. [20]

Turussa ja Tampereella toiminnallista suunnittelua on käytetty huomattavasti Helsingistä vähemmän. Turun viranomaisten kanta puukerrostalojen toiminnalliseen paloturvallisuussuunnitteluun on varovaisen hyväksyvä, ja sitä käytetään suunnitteilla olevassa puukerrostalossa. Tampereen viranomaisten mielestä toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu ei sovi puukerrostaloihin.

3.2 Ääneneristys

3.2.1 Äänen ominaisuudet

Ääni on mekaanista värähtelyä väliaineessa eli paineen vaihtelua staattiseen väliaineen paineeseen nähden. Väliaine voi olla kaasua, nestettä tai kiinteää ainetta. Äänelle annetaan nimityksiä sen perusteella, missä väliaineessa ääni etenee. Ilmassa etenevä ääni on ilmaääntä ja rakennuksen rungossa etenevä ääni on runkoääntä. [21]

Äänenä aistittavasta ilmanpaineen muutoksesta käytetään nimitystä äänenpaine. Ihmisen kuulokynnyksen äänenpaine on $20 \mu\text{Pa}$. Kipukynnys ylittyy, kun äänenpaine ylittää 20 Pa . Ihmisen kuulokynnyksen ja kipukynnyksen ero on äänenpaineena mitattuna erittäin suuri. Kipukynnyksen äänenpaine on miljoonakertainen kuulokynnyksen äänenpaineeseen verrattuna. Siksi äänen voimakkuutta kuvataan äänenpainetasona. Äänenpainetaso kuvaa logaritmisella asteikolla taulukossa 3.7. esitetyllä tavalla mitatun äänenpaineen suhdetta vertailuäänepainetasoon. Vertailuäänepainetasona on ihmisen kuulokynnyksen äänenpaine. Äänenpainetason yksikkö on äänenpainedesibeli [dB]. [21, s. 28]

Äänilähteen kyky tuottaa ääntä ilmoitetaan äänitehona. Ääniteholla mitattuna ihmisen kuulokynnyksen ja kipukynnyksen ero on vielä huomattavasti suurempi kuin äänenpaineella mitattuna. Kuulokynnys on 1 pW ja kipukynnyksen raja on 1 W . Kipukynnyksen ääniteho on siis miljoonakertainen kuulokynnykseen verrattuna, joten lukuarvojen yksinkertaistamiseksi äänilähteen tuottamaa tehoa kuvataan logaritmisella asteikolla äänitehodesibeleinä [dB]. Äänitehotaso määritellään taulukossa 3.7. esitetyllä mitatun äänitehon ja vertailuäänitehon suhteena. Vertailutasona on äänenpainetason tapaan kuulokynnyksen raja. [21, s. 33]

Taulukko 3.7. Äänenpaine ja ääniteho [21]

Äänenpaine p (Pa)		Äänenpainetaso L_p (dB)
Kuulokynnys p_0	20×10^{-6}	$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0}$
Kipukynnys	20	
		$p = \text{tarkasteltava äänenpaine}$
Ääniteho W (W)		Äänitehotaso L_W (dB)
Kuulokynnys W_0	1×10^{-12}	$L_W = 10 \lg \frac{W}{W_0}$
Kipukynnys	1	
		$W = \text{tarkasteltava ääniteho}$

Äänenpainetason määritelmän mukaan 20 dB :n äänenpainetason nousu tarkoittaa äänenpaineen kymmenkertaistumista ja 60 dB :n nousu äänenpaineen tuhatkertaistumista. Äänitehontasolla mitattuna 10 dB :n nousu merkitsee äänitehon kymmenkertaistumista ja 30 dB :n nousu äänitehon tuhatkertaistumista. Kuulokynnyksen äänenpaine- ja äänitehotaso on 0 dB ja kipukynnyksen 120 dB .

Äänentaajuus tarkoittaa ääniaallon värähtelyiden määrää sekunnissa. Mitä suurempi äänentaajuus on, sitä korkeampana ääni kuullaan. Ihminen pystyy kuulemaan värähtelyn, jonka taajuus on $20\text{--}20\,000 \text{ Hz}$. Alle 20 Hz :n taajuiset äänet aistitaan värinänä. Äänentaajuudella on rakenteiden suunnittelussa ratkaiseva merkitys, koska niiden äänitekniset ominaisuudet ovat taajuudesta riippuvaisia. [21]

Jälkikaiunta-aika kuvaa, kuinka nopeasti äänilähteen tilaan tuottama ääni vaimenee, kun äänilähde lopettaa toimintansa. Jälkikaiunta-aika määritellään siten, että sen kulussa huoneen äänenpainetaso laskee 60 dB . Jälkikaiunta-aikaan vaikuttaa tilan koon lisäksi

si absorptioala. Absorptio tarkoittaa ääniaaltojen imeytymistä huokoiseen aineeseen. Absorptio kuvaa, kuinka suuri osa aineen kohdanneesta äänitehosta siirtyy siihen eli absorboituu lämmöksi tai aineen liike-energiaksi, kuten rakenteiden värähtelyksi. Absorptioala on aineen absorboimiskyvyn ja sen pinta-alan tulo. Absorboimiskyky eli absorptiosuhde on aineeseen absorboituneen äänitehon suhde ainetta kohdanneeseen äänitehoon. [21]

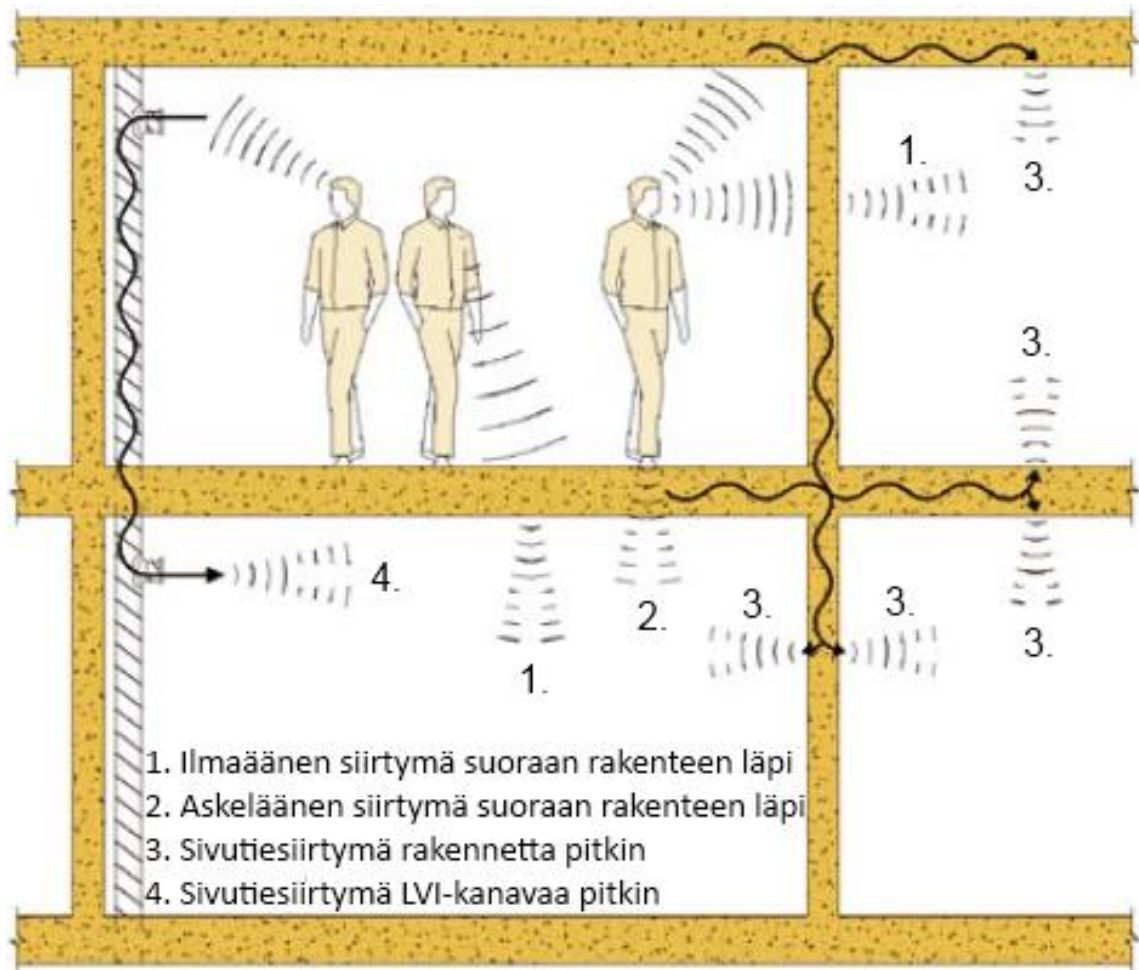
3.2.2 Rakennusten akustiikka

Yleisesti akustiikasta puhuttaessa tarkoitetaan tilojen huoneakustiikkaa ja se liitetään tavallisesti huoneakustiikaltaan vaativiin tiloihin, kuten konserttisaleihin tai elokuvateattereihin. Huoneakustiikka on kuitenkin vain yksi talonrakentamisen akustiikan osa-alueista. Se käsittelee äänen käyttäytymistä saman tilan sisällä. Muut talonrakentamisen akustiikan osa-alueet ovat tärinäeristys, meluntorjunta ja rakennusakustiikka. Tärinäeristyksellä tarkoitetaan laitteista ja koneista aiheutuvien tärinöiden eristämistä rakennuksen rungosta, ja meluntorjunta käsittää rakennuksen ulkopuolisen melun, kuten liikenteen, sekä sisäpuolisista laitteista aiheutuvan melun torjunnan. [21, s. 16]

Rakennusakustiikka eli ääneneristys koskee äänen siirtymistä rakennusten eri tilojen välillä. Ääneneristys jaetaan äänen luonteen mukaan ilmaääneneristävyys ja runkoääneneristävyys eli askeläänieristävyys. [21, s. 16]

Rakennuksissa ilmaääniä syntyy ihmisen tekemistä toiminnoista ja laitteiden tuottamista äänistä, kuten musiikista, sekä rakennuksen ulkopuolisista äänilähteistä. Tavallisin ilmaääni on ihmisen puhe. Askelääni on nimitys rakennuksessa esiintyville runkoäänille, joita synnyttävät kaikki rakenteisiin kohdistuvat iskut. Askelääniä tuottavat kävely, esineiden putoileminen ja huonekalujen siirtely. Ilma- ja runkoääni liittyvät läheisesti toisiinsa, sillä riittävän voimakas ilmaääni synnyttää runkoääntä eli rakenteiden värähtelyä, joka synnyttää ilmaääntä värähtelevän rakenteen toiselle puolelle. [22, s. 10]

Kerrostalossa syntyvät äänet siirtyvät tilasta toiseen erilaisia reittejä pitkin. Tavallisin siirtymäreitti on suoraan tilojen välisten rakenteiden läpi. Äänen etenemisreitit on näytetty kuvassa 3.6. [21, s. 10]



Kuva 3.6. Äänen etenemisreitit rakennuksessa [22, s. 11]

Tavallisimman suoran siirtymäreitit lisäksi rakennuksen tilojen välillä on sivutiesiirtymäreittejä. Sivutiesiirtymä tarkoittaa äänen kulkeutumista muita reittejä pitkin kuin suoraan tarkasteltavan rakenteen läpi. Sivutiesiirtymäreittejä ovat yhtenäiset tilojen läpi jatkuvat rakenteet ja LVI-kanavat, kuten ilmanvaihto- ja lämpöpatteriputket. [22, s. 10]

3.2.3 Ilma- ja askelääneneristys

Rakenteen ilmaääneneristävyys R kertoo, kuinka paljon rakennetta kohdanneesta äänitehosta siirtyy sen toiselle puolelle. Se määritellään äänitehotason tapaan logaritmisella asteikolla rakennetta kohdanneen ja sen toiselle puolelle siirtyneen äänitehon suhteena. Rakenteen ilmaääneneristävyyden ollessa 10 dB, rakenteen läpäisee yksi kymmenesosa äänitehosta ja 30 dB:n ilmaääneneristävyydellä yksi tuhannesosa. [21, s. 47]

Äänitehoja ei ole kuitenkaan käytännössä mahdollista mitata suoraan. Niinpä rakennuksen eri tilojen välisiä ilmaääneneristyyksiä mitataan tiloissa vallitsevien äänenpainetasojen avulla. Ilmaääneneristävyyttä voidaan joko mitata laboratoriossa tai kenttäolosuhteissa. Laboratoriossa voidaan mitata yksittäisten rakenneosien, kuten seinien ja välipohjien ilmaääneneristävyyttä. Tilojen todellista ilmaääneneristävyyttä voidaan mitata vain kenttäkokeilla, koska rakennusten tilat muodostuvat monesta eri tiloja erottavasta ja sivuavasta rakenneosasta. Laboratorio-olosuhteissa mitatuista ilmaääneneristä-

vyyksistä käytetään merkintää R ja kenttämittausten ilmaääneneristävyyksistä merkintää R' . [21]

Rakenteiden ilmaääneneristävyys on erilainen eri taajuuksilla. Suunnittelu- ja laskenta-arvojen yksinkertaistamiseksi ilmaääneneristävyydet esitetään kuitenkin vain yhtenä ilmaääneneristyslukuna R_w tai R'_w . Ilmaääneneristysluvun määrittelyssä painotetaan ihmisen kuulon kannalta herkimpiä ja kuulokokemuksen perusteella haitallisimpia taajuusalueita. Tavallisesti tällaisena taajuusalueena pidetään 100–3150 Hz:n aluetta. [21]

Askeläänen siirtyminen tilasta toiseen ei ole yhtä yksinkertaista kuin ilmaäänen. Askeläät syntyvät rakenteisiin kohdistuvista iskuista, ja niiden kulkeutuminen tilasta toiseen riippuu muun muassa sivutiesiirtymästä, johon vaikuttaa suuresti äänilähteen paikka. Askelääneneristävyyttä mitataan standardoidun askeläänikojeen avulla. Koje asetetaan lähetyshuoneeseen vähintään neljään eri paikkaan ja sen aiheuttamia äänenpainetasoja mitataan vastaanottohuoneessa. Rakenteen tai rakennusosan askelääneneristävyyden arvo on mitattujen äänenpainetasojen keskiarvo. Askelääneneristävyys on sitä parempi, mitä pienempiä mitatut arvot ovat. Vastaanottohuoneessa mitatuista äänenpainetasoista käytetään laboratorio-olosuhteissa merkkiä L ja kenttäolosuhteissa merkkiä L' . Laboratoriossa pystytään mittaamaan vain yksittäisten rakenneosien askelääneneristävyyttä, ja todelliset arvot mitataan kenttäkokeilla.

Askelääneneristävyyden arvo on erilainen eri taajuuksilla. Rakenteiden askelääneneristävyys esitetään ilmaääneneristävyyden tavoin vain yhdellä painotetulla edellä mainitun taajuusalueen huomioon ottavalla luvulla, joka on askeläänitasoluku. Askeläänitasoluvun merkintä on $L_{n,w}$ tai $L'_{n,w}$.

3.2.4 Rakennusten ääneneristysmääräykset

Suomen rakentamismääräysten osa C1 Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa määrittelee, että rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, että rakennuksessa esiintyvä melu ei aiheuta vaaraa rakennuksessa olevien ihmisten terveydelle. Rakennuksen pitää antaa ihmisille mahdollisuus nukkua, levätä ja työskennellä hyvissä olosuhteissa. Vaatimusten täyttymiseksi rakennus suunnitellaan ja rakennetaan C1:ssä esitettyjen ääneneristysarvojen tai tapauskohtaisen tarkastelun mukaan, jossa otetaan huomioon rakennuksen yksityiskohtaiset ominaisuudet. Asuin- ja työpaikkarakennusten kohdalla vaatimukset täyttyvät, mikäli rakennuksen tilat täyttävät taulukossa 3.8. olevat ääneneristysvaatimukset. [23]

Taulukko 3.8. Asuin- ja työpaikkarakennusten ääneneristysvaatimukset [23]

Asunnot		Työpaikat	
Ilmaääneneristysluvun R'_w (dB) minimiarvo		Ilmaääneneristysluvun R'_w (dB) minimiarvo	
Asuinhuoneiston ja sitä ympäröivien tilojen välillä	55	Työskentelutilojen ja työskentelytilan ja käytävän välillä, kun välissä ei ole	44
Asuinhuoneistoja palvelevan uloskäytävän välillä, kun välissä on ovi	39	Työskentelytiloja palvelevan uloskäytävän välillä, kun välissä on ovi	-
Askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ (dB) maksimiarvo		Askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ (dB) maksimiarvo	
Asuinhuoneistoa ympäröivistä tiloista asuinhuoneeseen	53	Työskentelytilaa ympäröivistä tiloista työskentelytilaan	-
Uloskäytävästä asuinhuoneeseen	63	Uloskäytävästä työskentelytilaan	-
Jälkikaiunta-aika T (s)		Jälkikaiunta-aika T (s)	
Uloskäytävässä, josta on käynti vähintään kahteen asuinhuoneistoon	1,3	Porrashuoneessa tai muussa käytävässä	1,3
LVIS-laitteiden keskiäänitaso $L_{A,eq}$		LVIS-laitteiden keskiäänitaso $L_{A,eq}$	
Keittiöissä	33	Työskentelyhuoneissa	33
Muissa asuinhuoneissa	28		
LVIS-laitteiden maksimiäänitaso $L_{A,max}$ (dB)		LVIS-laitteiden maksimiäänitaso $L_{A,max}$ (dB)	
Keittiöissä	38	Työskentelyhuoneissa	38
Muissa asuinhuoneissa	33		

Taulukossa olevat arvot ovat asuntojen osalta velvoittavia määräyksiä, joita tulee noudattaa. Esimerkiksi ilmaääneneristysluku 55 tarkoittaa, että rakennusosan läpäisee noin 0,003 promillea sitä kohdanneesta äänitehosta. Askelääniluku 53 sen sijaan tarkoittaa, että askeläänikojeen viereisessä tilassa tuottama ääni kuuluu huoneistossa 53 dB:n voimakkuudella, joka vastaa suunnilleen keskustelun äänen voimakkuutta. Työpaikkarakennusten osalta velvoittavia vaatimuksia ei ole ja taulukossa esitetyt arvot ovat ohjeellisia. Työpaikkojen osalta ääneneristysvaatimukset määritellään aina kohdekohtaisesti. [23]

Rakentamismääräysten C1-osassa annetaan lisäksi vaatimuksia LVIS-laitteiden äänitasoille. LVIS-laitteisiin lasketaan hissit, vesi- ja viemärlaitteet, ilmanvaihtolaitteet, kompressorit sekä jäähdytys- ja lämmityslaitteet. Laitteiden keskiäänitaso on $L_{A,eq}$ ja maksimiäänitaso $L_{A,max}$. Taulukon 3.8. laitteiden äänitasovaatimukset ovat työpaikkarakennusten kohdalla ohjeellisia. Lisäksi rakennusten muille huoneille on annettu rakentamismääräysten osassa D2 ohjeellisia arvoja LVIS-laitteiden äänitasoille. [21, 23]

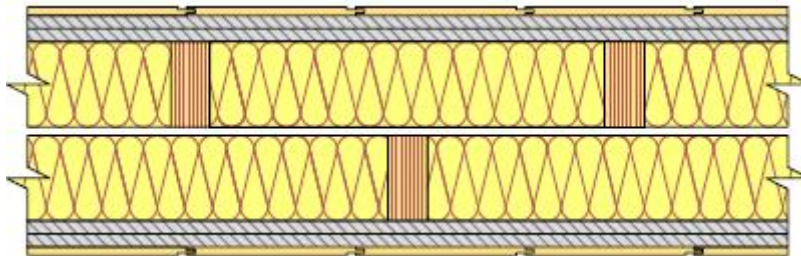
3.2.5 Puukerrostalorakenteiden ääneneristys

Rakenteiden ääneneristävyys vaikuttavat massa, jäykkyys ja rakennepaksuus. Yksinkertaisesti ajateltuna rakenteen ääneneristävyys riippuu sen massasta. Raskaat betonirakenteet värähtelevät samasta äänenpaineesta vähemmän kuin kevyet puurakenteet, jolloin ne eristävät paremmin ääntä. Lisäksi eri rakenteilla on rajataajuuksia, joilla niiden ääneneristävyys heikkenee ja rakenteen äänitekninen käyttäytyminen muuttuu. Merkittävin näistä rajataajuuksista on niin sanottu koinsidenssin rajataajuus, koska se sijaitsee yleensä taajuualueella 100–3150 Hz. Koinsidenssin rajataajuus on sitä suu-

remppi, mitä suurempia rakenteen jäykkyys ja rakennepaksuus ovat ja mitä pienempi rakenteen massa on. Puu on kevyt rakennusmateriaali, ja lisäksi lähes kaiken rakentamisessa käytetyn puutavaran ja puulevyjen koinsidenssin rajataajuus on alueella, jota tulisi välttää. Näiden ominaisuuksien takia puuta ei voi käyttää ääntä eristävänä rakennusmateriaalina. [21]

Puukerrostalorakenteiden riittävä ääneneristävyys saavutetaan lisäämällä rakenteiden massaa ja tekemällä rakenteista kaksinkertaisia. Yleisimmin rakenteiden massaa lisätään kipsilevyillä, koska niillä on puuta suuremman tiheyden lisäksi myös palonsuojausominaisuuksia. Betonia käytetään välipohjien pintavaluissa. Liiallinen massan lisääminen ei kuitenkaan ole kustannustehokasta, koska suurempi lisäys ääneneristävyyteen saadaan aikaan kaksinkertaisella rakenteella. Kaksinkertainen rakenne muodostuu kahdesta osasta, joiden välissä on ilmapäli tai absorboivalla materiaalilla, kuten pehmeällä villalla, täytetty ilmapäli. Kaksinkertaisen rakenteen ääneneristävyys perustuu kahden levymäisen massan ja niiden välissä olevaan niin sanotun ilmajousen yhteistoimintaan. [21, 22]

Rakentamismääräyksissä vaaditun ilmajouseneristävyyden saavuttamiseksi puukerrostalojen eri tilojen välisten seinien rakenteen tulee olla periaatteeltaan kuvan 3.7. mukaisia kaksinkertaisia rakenteita. Rakenteen molemmissa pinnoissa tulee olla massaa lisäävä yksi- tai kaksikerroksinen levyrakenne. Ilmajousin pitää olla riittävän paksu, ja se täytetään osittain tai kokonaan ääntä absorboivalla materiaalilla, kuten pehmeällä villalla. Kantavat rakenteet eivät saa olla kosketuksissa toisiinsa. [21, 22]

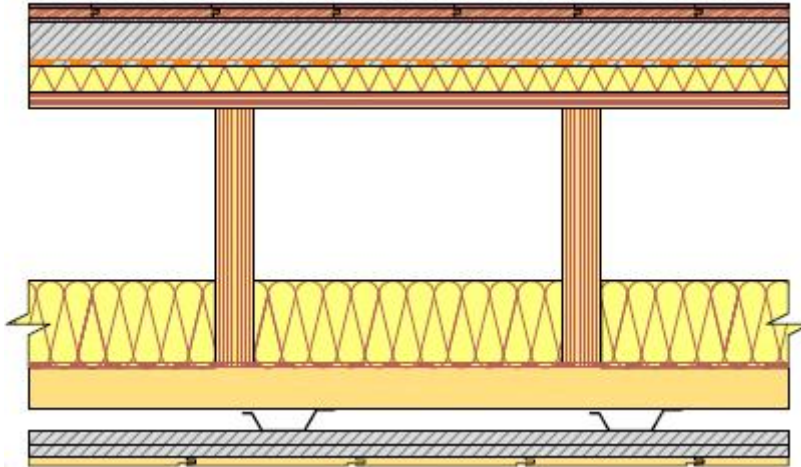


Kuva 3.7. Puurunkoinen huoneistojen välinen itsensä kantava seinä [24]

Puisten ulkoseinärakenteiden ilmajouseneristävyyden ei yleensä tarvitse olla huoneistojen välisten seinien luokkaa, koska ulkoa tulevat äänet ovat tavallisesti rakennuksen tiloissa syntyviä ääniä heikompia. Ulkoseinien rakenteissa ilmajouseneristys tulee mitoitettavaksi vain erikoistapauksissa, jolloin ulkoinen melu on esimerkiksi liikenteen tai teollisuuden takia erityisen voimakasta.

Puukerrostalojen tilojen väliset välipohjat noudattavat ilmajouseneristyksen kannalta samoja edellä mainittuja periaatteita kuin huoneistojen väliset seinärakenteetkin. Välipohjiin kohdistuu lisäksi askelääniä, joiden takia niiden massaa lisätään riittävän paksulla pintavalulla. Pintavalu voi olla betonia tai kipsiä. Pintavalun alapuolella pitää yleensä olla joustava, askelääniä vaimentava kova villakerros. Kuvan 3.8. välipohjarakenne on äänieristysvaatimukset toteuttava. Kuvassa rakenteen alapinnassa on massaa tuova yksi- tai kaksikerroksinen levyrakenne, joka pitää levyrakenteen erottamiseksi kantavasta puurakenteesta kiinnittää joustavasti välipohjan puurakenteeseen. Pintavalu- ja levyker-

roksen välissä on osittain tai kokonaan ääntä absorboivalla materiaalilla täytetty ilmaväli. [21, 22]



Kuva 3.8. Puurunkoinen huoneistojen välinen välipohja [24]

Betonirakenteiden massiivisuuden ja yhtenäisyyden takia perinteisissä kerrostaloissa välipohjat ja seinät voidaan äänen rakenteellisesta sivutiesiirtymästä huolimatta tehdä jatkuviksi. [21] Esimerkiksi välipohjat tehdään yhtenäisiksi jäykiksi rakenteiksi, jolloin rakennus pystytään jäykistämään muutamalla jäykistelinjalla. Kuormat siirtyvät jäykkiin yhtenäisten välipohjien kautta jäykistäville linjoille.

Puukerrostalojen kevyet rakenteet muodostuvat levymäisistä kerroksista, joiden yksittäiset ääneneristävyydet ovat huonoja. Tästä johtuen sivutiesiirtymien välttämiseksi puukerrostalojen rakenteet on katkaistava eri tilojen välillä ja niiden välisiin liitoksiin pitää asentaa erilliset tärinäeristimet. [21] Puukerrostalojen välipohjia ei kyseisestä seikasta johtuen voida tehdä yhtenäisiksi, ja rakennusten kokonaisjäykistys on toteutettava useammalla eri jäykistelinjalla.

3.3 Puurakenteiden suunnittelu

3.3.1 Rakennesuunnitteluperusteet

Rakennusten kantavat ja jäykistävät rakenteet suunnitellaan käyttämällä rajatilamitoitusta. Rajatilamitoitus jaetaan murto- ja käyttörajatilamitoitukseen. Murtorajatilamitoituksessa tarkastellaan, kestävätkö rakenteet murtumatta erilaisten kuormien niille aiheuttamat rasitukset. Murtorajatilassa rakenteiden mitoitusperusteena on rakenteiden lujuus. Käyttörajatilassa tarkastellaan rakenteiden muodonmuutoksia. Kuormien ja kosteuden vaikutuksesta rakenteisiin syntyvien muodonmuutosten tulee pysyä riittävän pieninä. Muodonmuutokset ovat riittävän pieniä, jos ne eivät aiheuta vahinkoa lattioille, katoille, keveille väliseinille tai tuota haittaa toiminnalle tai ulkonäölle. [25]

Puurakenteiden suunnittelun erityispiirteinä on vaakarakenteiden eli väli- ja yläpohjien rakennetekninen suunnittelu. Puisten vaakarakenteiden dimensioiden määräytyvät asuin- ja työpaikkakerrostalojen normaaleilla jänneväleillä aina käyttörajatilassa. Puura-

kenteiden käyttörajatilamitoituksessa muodonmuutoksista huomioidaan liitossiirtymät, värähtely ja taipuma, joista merkittävimmät ovat värähtely ja taipuma. [25]

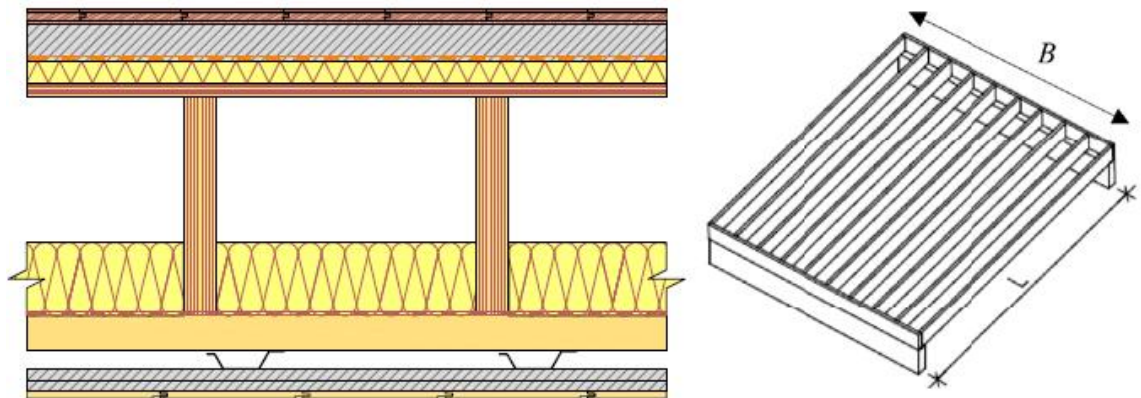
3.3.2 Värähtely

Pesukoneet ja muut liikkuvia osia sisältävät laitteet ja koneet sekä ihmisten kävely aiheuttavat askeläänten lisäksi matalataajuista värähtelyä, joka syntyy niiden jaksottaisista iskuista välipohjiin. Värähtely voidaan kokea esimerkiksi haitallisina kehon tuntemuksina, esineiden heilumisena tai astioiden aiheuttamina kilisevinä ääninä. Koneiden aiheuttaman jatkuvan värähtelyn hyväksyttävä taso on määrätty kansainvälisellä standardilla. Kävelystä aiheutuvat värähtelyt otetaan huomioon välipohjien suunnittelussa. Ihmisen kävelyyn verrattavia voimakkaampia herätteitä, kuten hyppiminen tai juokseminen, ei oteta huomioon, koska ne ovat harvinaisia varsinkin hiljaiseen vuorokauden-aikaan. [25, 26]

Kävely on jaksottainen ja iskumainen heräte. Sen matalin jaksottainen kuormitus on taajuudella 1,6–2,2 Hz. Kuormitusta esiintyy lisäksi edellä mainitun taajuuden toisella ja kolmannella monikerralla taajuusalueella 3,1–8,8 Hz. Kävelyn aiheuttama värähtely koetaan haitalliseksi varsinkin silloin, jos välipohja alkaa resonoida eli myötävärähdellä kävelyn aiheuttamien kuormituskomponenttien kanssa. Myötävärähtely on mahdollista silloin, kun välipohjan ominaistaajuus on sama kuin kävelyn aiheuttama värähtelytaajuus. Toinen erittäin haitalliseksi koettu välipohjan muodonmuutos on kävelystä johtuva välipohjan hetkellinen painuma. [26]

Suomessa kävelystä johtuva välipohjien resonanssi-ilmiö estetään määräyksellä, jonka mukaan välipohjan ominaistaajuuden pitää olla yli 9 Hz. Tällöin välipohja ei ala myötävärähdellä, koska kävelyn aiheuttama taajuus on korkeimmillaankin alle 9 Hz. Välipohjan hetkellinen painuma 100 kg:n massasta eli 1 kN:n painosta saa olla maksimissaan 0,5 mm. [25]

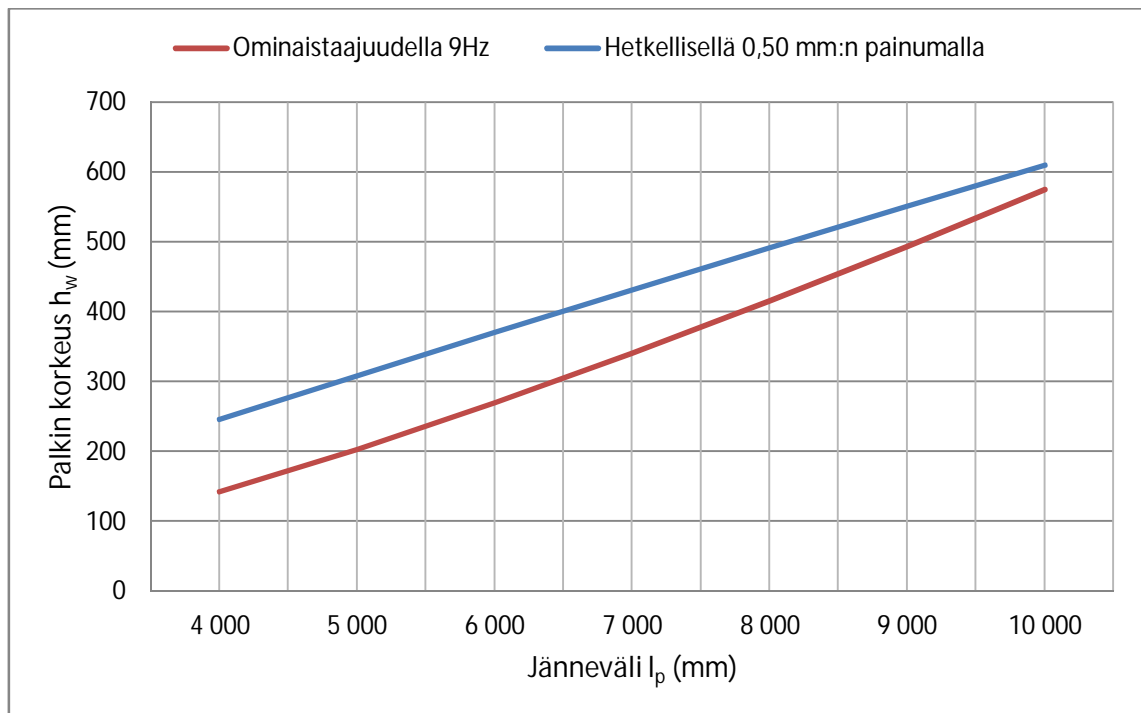
Yleisin puukerrostalojen välipohjarakenne on kuvan 3.9. laattapalkkirakenteinen yksiaukkoinen välipohjarakenne, jonka päällä on askelääntä eristävä kelluva pintavalu. Kantavana rakenteena on laattapalkkisto, joka muodostuu kerto- tai liimapuupalkeista, joiden päälle on liimattu vanerilevy. Pintavaluna on betoni- tai kipsivalu.



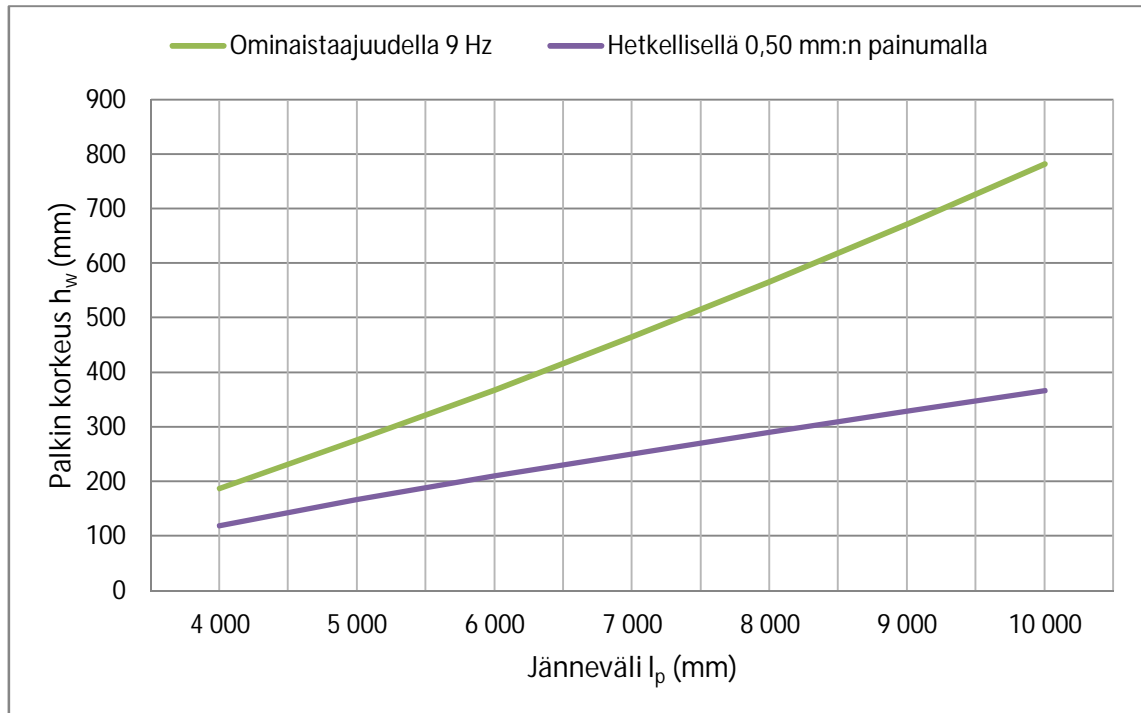
Kuva 3.9. Laattapalkkirakenteinen välipohja [24, 27]

Välipohjien ominaistaajuus on sitä suurempi, mitä suurempi rakenteen jäykkyys on ja mitä pienempi rakenteen massa on. Välipohjat jaetaan ominaistaajuutensa mukaan korkeataajuisiin ja matalataajuisiin. Korkeataajuiset välipohjat ovat kevyitä, ja niillä hetkellinen taipuma hallitsee värähtelymitoitusta. Välipohjan massan kasvaessa sen ominaistaajuus pienenee, jolloin värähtelymitoituksen hallitsevaksi tekijäksi nousee ominaisvärähtely. [26]

Puukerrostalojen tilasuunnittelun kannalta on tärkeää tietää, millaisiin jänneväleihin erilaisilla välipohjapalkistoilla voidaan päästä, kun ominaistaajuuden ja hetkellisen painuman vaatimukset täytetään. Kuvissa 3.10. ja 3.11. esitetyt värähtelymitoitustulokset on laskettu kuvan 3.9. mukaisella välipohjarakenteella, jossa laattapalkki muodostuu 51 mm leveästä kerto-S-puusta, jonka päällä on 21 mm paksu havuvanerilevy. Välipohjapalkkien jako on 400 mm. Kuvassa 3.10. on välipohjapalkin minimikorkeus jännevälin funktiona ilman pintavalua. Kuvassa 3.11. on välipohjapalkin minimikorkeus, kun sen päällä on 60 mm pintavalu. Laskut ovat liitteessä 2.



Kuva 3.10. Välipohjapalkin minimikorkeus jännevälin funktiona ilman pintavalua



Kuva 3.11. Välipohjapalkin minimikorkeus jännevälin funktiona 60 mm:n pintavalulla

Kuvasta 3.10. huomataan, että ilman pintavalua välipohjapalkin korkeus määräytyy hetkellisestä 0,50 mm:n painumaehdosta. Kyseessä on korkeataajuinen kevyt välipohja. Välipohjan paino on $0,5 \text{ kN/m}^2$. Jälkimmäisessä kuvassa 3.11. välipohjassa on askelääneneristävyyden kannalta lähes välttämätön pintavalu. 60 mm:n pintavalun ansiosta välipohjan paino on $2,0 \text{ kN/m}^2$, joka on nelinkertainen pintavaluttomaan välipohjaan nähden. Välipohjarakenne on matalataajuinen raskas välipohja, ja välipohjapalkin korkeuden määrää jo selvästi 9 Hz:n ominaistaajuusraja.

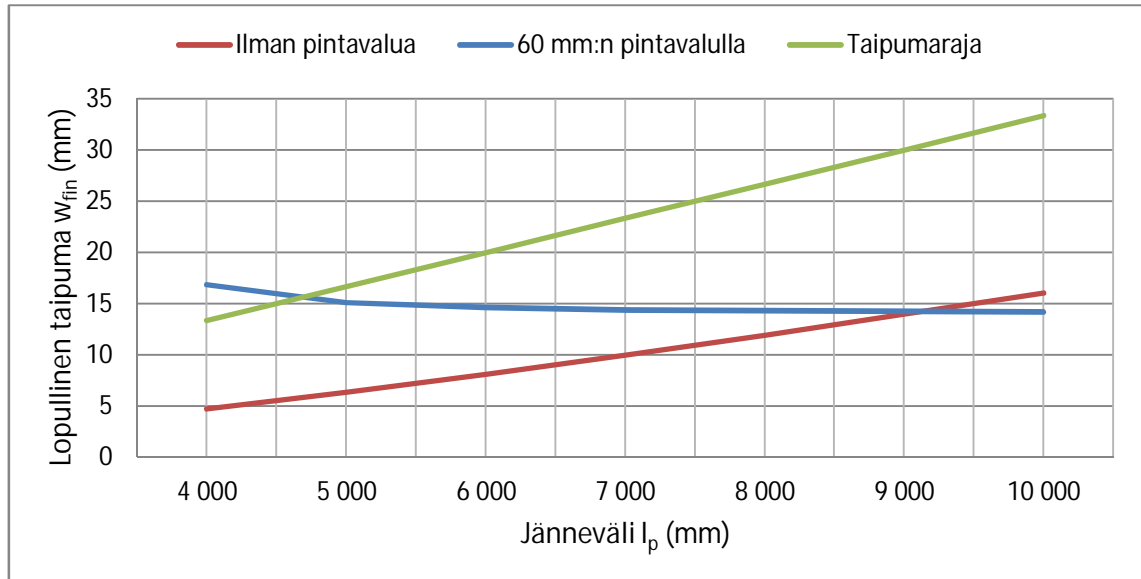
Välipohjaa ei ole järkevää rakentaa liian paksuksi, koska silloin kerroskorkeudet kasvavat ja rakentaminen ei ole enää kustannustehokasta. Kuvasta 3.11. nähdään, kuinka nopeasti välipohjapalkin korkeus kasvaa jännevälillä kasvaessa. Palkin korkeus on 4 metrin jännevälillä alle 200 mm ja 10 metrin jännevälillä lähes 800 mm. Kuvan 3.9. pintavalullisella välipohjarakenteella maksimijännevälinä voidaan pitää noin 7:ää metriä. Silloin välipohjapalkin korkeus on noin 450 mm ja välipohjan kokonaispaksuudeksi alakattorakenteet mukaan lukien tulee 650 mm.

3.3.3 Taipuma

Puu on lujuuteensa nähden suhteellisen elastinen materiaali, mikä tarkoittaa sitä, että puurakenteet taipuvat ja käyristyvät, mutta kestävät silti murtumatta rasituksen alaisena. Pitkiä puurakenteita on puukerrostaloissa välipohjissa ja yläpohjissa. Suuret taipumat aiheuttavat vahinkoa liittyville väliseinärakenteille sekä lattia- ja kattomateriaaleille. Liiallinen taipuma on myös ulkonäköä ja käyttöä haittaava tekijä.

Väli- ja yläpohjien pääkannattimien taipumia on rajoitettu määräyksillä, jotka asettavat taipumarajoja hetkelliselle ja lopulliselle taipumalle. Hetkellinen taipumaraja on jännevälillä neljäsosana ja lopullisen taipuman raja on jännevälillä kolmasosana.

Hetkellinen taipuma on kaikkien rakennetta rasittavien kuormien vaikutuksesta äkillisesti aiheutuva taipuma. Lopullisen taipuman arvioinnissa otetaan huomioon kuormien pitkäaikaisuudet eli kuormitusten kestot sekä kuormista ja ympäristöolosuhteista johtuva rakenteen pitkäaikainen muodonmuutos eli viruma. Kuvassa 3.12. on esitetty kuvan 3.9. välipohjan lopulliset taipumat jännevälin funktiona. Välipohjapalkin korkeuksina on käytetty edellisessä värähtely-alaluvussa laskettuja arvoja.



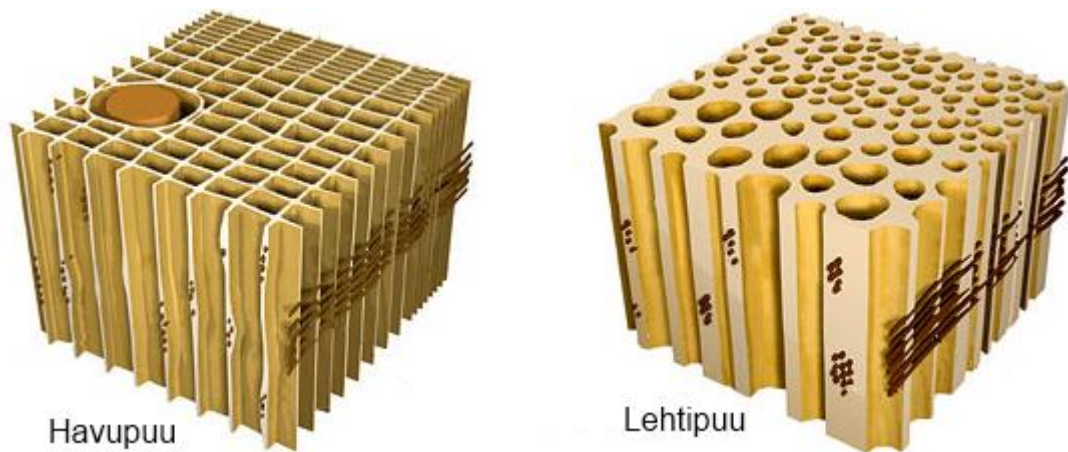
Kuva 3.12. Välipohjapalkin lopullinen taipuma värähtelymitoituksesta saaduilla h_w :n arvoilla

Kuvan käyristä nähdään, että kyseisen välipohjan mitoittavaksi tekijäksi nousee taipuma vain alle 4,5 metrin jänneväleillä, kun välipohjassa on pintavalu. Muuten välipohjan mitoittaa aina sen värähtely. Pintavalullisilla välipohjilla värähtely nousee pitkillä jänneväleillä selvästi ratkaisevaksi tekijäksi. Taipuma jopa pienenee jännevälin kasvaessa, koska värähtelymitoituksessa saadut palkin korkeuden arvot kasvavat niin nopeasti.

Yleisesti voidaan todeta, että puukerrostalojen välipohjien korkeuden mitoittaa pienillä, alle 4,5 metrin jänneväleillä taipuma ja sitä suuremmilla jänneväleillä värähtelyn ominaistaajuusheito. Värähtelymääräykset eivät koske yläpohjia, joten kattorakenteiden osalta taipuma mitoittaa rakenteet.

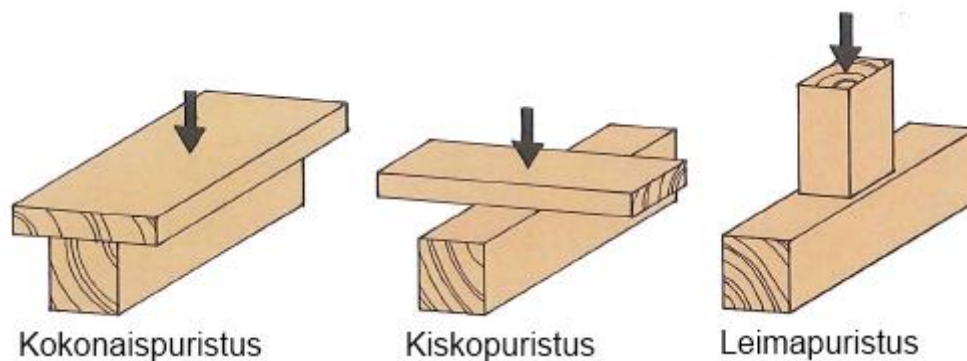
3.3.4 Puun lujuus

Puun pienimmät rakenteelliset yksiköt ovat puusoluja. Solut ovat valtaosin puun pituussuuntaisia, pitkiä putkimaisia yksiköitä, jotka muodostavat kennomaisen solurakenteen, jossa elävän puun tarvitsemat ravinteet ja vesi kulkeutuvat juurista latvaan. Eri puulajien solut ovat fysikaaliselta perusmuodoltaan samanlaisia, vaikka eroavatkin kooltaan ja muodoltaan solutyypin sekä puulajin mukaan. Kuvassa 3.13. on suomalaisen havu- ja lehtipuun solukkorakenne. Kuvasta huomataan, että molemmat solukkorakenteet ovat putkien erilaisesta muodosta huolimatta periaatteeltaan samanlaisia kennomaisia putkirakenteita. [28]



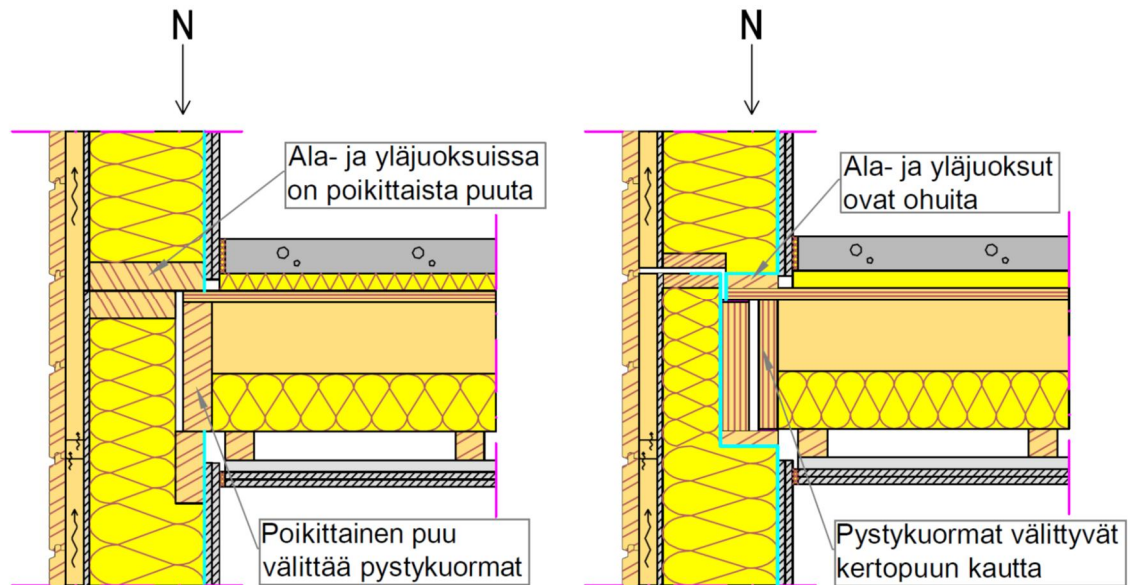
Kuva 3.13. Suomalaisen havu- ja lehtipuun solukkorakenne [28]

Puun solukkorakenteesta johtuen se on anisotrooppinen materiaali eli sen ominaisuudet ovat erilaisia eri suuntiin. Lujusominaisuudet ovat siten hyvin riippuvaisia puuhun kohdistuneen kuorman suunnasta. Puun syiden suuntaiset veto- ja puristuslujuus ovat monikymmenkertaisia verrattuna syitä vasten kohtisuoriin lujuuksiin. Syitä vasten kohtisuora puristuslujuus on lisäksi riippuvainen siitä, miten puristava voima kohdistuu puun pintaan. Voima voi kohdistua koko pinnalle kokonaispuristuksena tai vain osalle pintaa kisko- tai leimapuristuksena. Kuvassa 3.14. on esitetty puristusvoiman kohdistustavat. [4]



Kuva 3.14. Puristusvoiman kohdistustavat [4, s.47]

Puukerrostalojen rakenteissa puun anisotrooppisuudesta johtuva heikko syitä vasten kohtisuora puristuskestävyys on otettava huomioon pystykuormia välittävissä liitoksissa. Kuvan 3.14. kokonaispuristustyypisiä liitoksia ovat seinien liitokset väli- ja yläpohjiin. Leimapuristus- eli leimapaineliitoksia ovat esimerkiksi rankarakenteisissa puukerrostaloissa seinärakojen liitokset ala- ja yläjuoksupuuhun. Kuvassa 3.15. on kaksi rankarakenteista ulkoseinäliitosta, joista vasen on perinteinen kaksikerroksisen pientalon paikalla rakennettu välipohjaliitos ja oikeanpuoleinen on kerrostaloihin soveltuva elementtiliitos.



Kuva 3.15. Poikittainen puu ulkoseinäliitoksessa

Kuvassa vasemmalla puolella olevassa liitoksessa välipohja on kannatettu sahatavara-palkilla ja seinärankojen ala- ja yläjuoksut ovat sahatavaraa. Liitoksessa on paljon niin sanottua poikittaista puuta eli puuta, joiden syyt ovat kohtisuorassa kuormitusta vastaan. Poikittaiset puut painuvat pystykuorman vaikutuksesta kasaan, jolloin liitokseen saattaa aiheutua pystykuormasta riippuen jopa 10mm:n suuruinen painuma. Puukerrostaloissa suuri kerroksittainen painuma ei ole hyväksyttävää, koska se aiheuttaa vahinkoa liittyville rakenteille. Julkisivun halkeamat ovat yleisimpiä painuman aiheuttamia vahinkoja.

Oikeanpuoleisessa on huomattavasti vähemmän poikittaista puuta. Kaikki poikittaiset syrjällä olevat kuormia välittävät puuosat ovat kertopuuta. Kertopuu kestää poikittaisen viilurakenteensa ansiosta puristusrasituksia myös syrjällä. Ainoaksi poikittaiseksi puuksi jäävät ala- ja yläjuoksupuut, jotka voidaan painuman pienentämiseksi tehdä ohuemmiksi. Kyseisen liitoksen painuma on kuormista riippuen noin kahden millimetrin luokkaa.

3.3.5 Puurakenteiden massa ja paksuus

Puuhun liittyvien ympäristö- ja työstettävyyssymysten lisäksi puulla on yksi ylivertainen rakenteellinen ominaisuus verrattuna teräsbetoniin. Puu painaa keskimäärin noin viisi kertaa vähemmän kuin teräsbetoni, mutta sen syiden suuntaiset puristus- ja vetolujuusominaisuudet ovat lähes samaa luokkaa. [25]

Suuri osa betonirakenteisen kerrostalon perustuksille tulevista pystykuormista aiheutuu rakenteiden omista massoista. Esimerkiksi betonirakenteisten asuin- ja työpaikkarakennusten välipohjien massa on yleensä yli 500 kg/m^2 tavallisen hyötykuorman ollessa 250 kg/m^2 . [25] Taulukossa 3.9. on vertailtu betoni- ja puuasuinkerrostalon kantavien rakenteiden massoja ja kokonaisrakennepaksuuksia. Rakenteet ovat keskenään vertailukelpoisia, koska ne ovat lämmön- ja ääneneristysominaisuuksiltaan sekä palonkestoltaan materiaalista riippumatta samaa tasoa.

Taulukko 3.9. Asuinkerrostalon tyypillisten kantavien rakenteiden paksuus ja massa [24, 25]

Rakennusosa	Materiaali	Rakennetyyppi	Paksuus (mm)	Massa (kg/m ²)
Ulkoseinä $U = 0,16$ W/m ² k	Betoni	Ohutrappaus	450	550
		Sandwich	500	700
	Puu	Rankarakenne, ulkoverhouslauta	385	95
		Massiivirakenne, ulkoverhouslauta	450	125
Huoneistojen välinen seinä $R'w \geq 55$	Betoni	Massiivirakenne	200	500
	Puu	Rankarakenne	280	95
		Massiivirakenne	330	165
Välipohja, jänneväli 5 m, $R'w \geq 55$, $L'w \leq 53$	Betoni	Ontelolaatta 27 + pintavalu	325	530
		Massiivilaatta 270 mm	280	700
	Puu	Rankarakenne + pintavalu	500	200
		Massiivirakenne + pintavalu	530	275

Taulukossa esitettyjen ulkoseinien paksuuteen vaikuttavat pääasiassa vain lämmöneristysvaatimukset, joiden ansiosta niiden paksuus on lähes samaa luokkaa betoni- ja puurakenteilla. Rankarakenteisten puuseinien hieman pienempi paksuus johtuu siitä, että kantavat rangat ovat lämmöneristyskerroksen sisällä. Ulkoseinien massoissa on huomattava ero. Puurakenteisten ulkoseinien massa on keskimäärin vain kuudesosa betonirakenteisten seinien massasta.

Huoneistojen välisissä seinissä puurakenne on ulkoseinien tapaan moninkertaisesti betonirakennetta kevyempi. Betonirakenne täyttää kuitenkin suuremman massansa ansiosta ääneneristysvaatimukset 200 millimetrin paksuisena. Ääneneristysvaatimukset täyttävän puurunkoisen väliseinän paksuus on rankarakenteilla 280 mm ja massiivisilla rakenteilla 330 mm.

Puurunkoisten välipohjien paksuus määräytyy värähtelymitoituksesta. Lisäksi niihin tarvitaan askelääneneristyksen johdosta massaa tuova pintavalu. Värähtelystä johtuen puurakenteisen välipohjan paksuus on viiden metrin jännevälillä jo lähes kaksinkertainen verrattuna betoniseen massiivilaattaan. Pakollisen pintavalun ansiosta puuvälipohjiin massa kasvaa, mutta se on silti vain noin kolmasosa betonivälipohjan massasta.

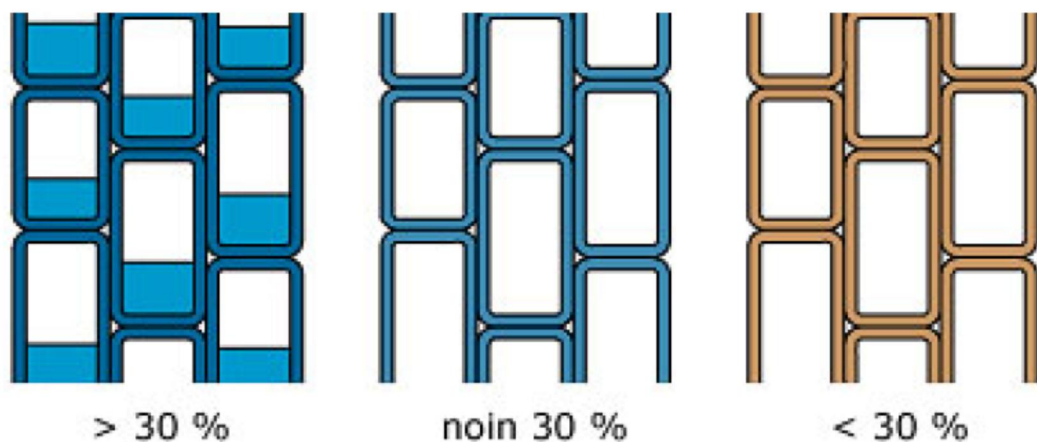
Kokonaisuudessaan puukerrostalon massa on noin viidesosa vastaavan betonirakenteisen kerrostalon massasta. Puukerrostalo voidaan siksi perustaa paaluttamattomana betonikerrostaloa huomattavasti heikommalle maalle tai paikkoihin, joissa on maapohjaa heikentäviä maanalaisia tunneleita tai käytäviä. Esimerkiksi Isossa-Britanniassa pystyttiin puun keveydestä johtuen rakentamaan 8-kerroksinen puukerrostalo vanhan viemäritunnelin päälle.

3.4 Kosteuden hallinta

3.4.1 Puun kosteustekniset ominaisuudet

Puu on kosteudelle altis hygroskooppinen eli vettä imevä materiaali. Puun soluihin pääsee vettä nesteinä kapillaarisesti imeytymällä, vesihöyrynä hiushuokoisia pitkin tai diffuusiona suoraan soluseinämän läpi. Kosteuden diffuusio ilman ja puun välillä tarkoittaa ilman sisältämän kosteuden liikkumista siten, että ilman ja puun sisältämät kosteudet ovat tasapainossa. Puun tasapainokosteus on siten ilman suhteellista kosteuspitoisuutta ja lämpötilaa vastaava tila. Tasapainokosteus kasvaa ilman suhteellisen kosteuden lisääntyessä ja pienenee lämpötilan noustessa. Esimerkiksi 20 °C:n lämpötilassa 80 prosentin suhteellisella ilman kosteudella puun tasapainokosteus on noin 15 painoprosenttia. Ilmassa on aina kosteutta, joten diffuusion johdosta myös ilmaan rajoittuvissa puurakenteissa on aina vettä. Diffuusiolle alttiiden puurakenteiden tasapainokosteus vaihtelee 8 ja 25 prosentin välillä. [4, 8]

Puun sisältämä vesi on sitoutuneena solujen seinämiin tai se on irrallaan soluonteiloissa. Kuvassa 3.16. on esitetty, kuinka puun sisältämä vesi sitoutuu puusolukkoihin. Puun kostuessa ensin täyttyvät puusolujen seinämät ja vasta sen jälkeen soluontelot. Kyllästymispiste on tila, jolloin seinämät ovat täynnä, mutta soluontelot eivät vielä sisällä vettä. Kyllästymispiste on Suomen valtapuulajeilla 20 °C:n lämpötilassa noin 30 painoprosenttia. [8, s. 20]

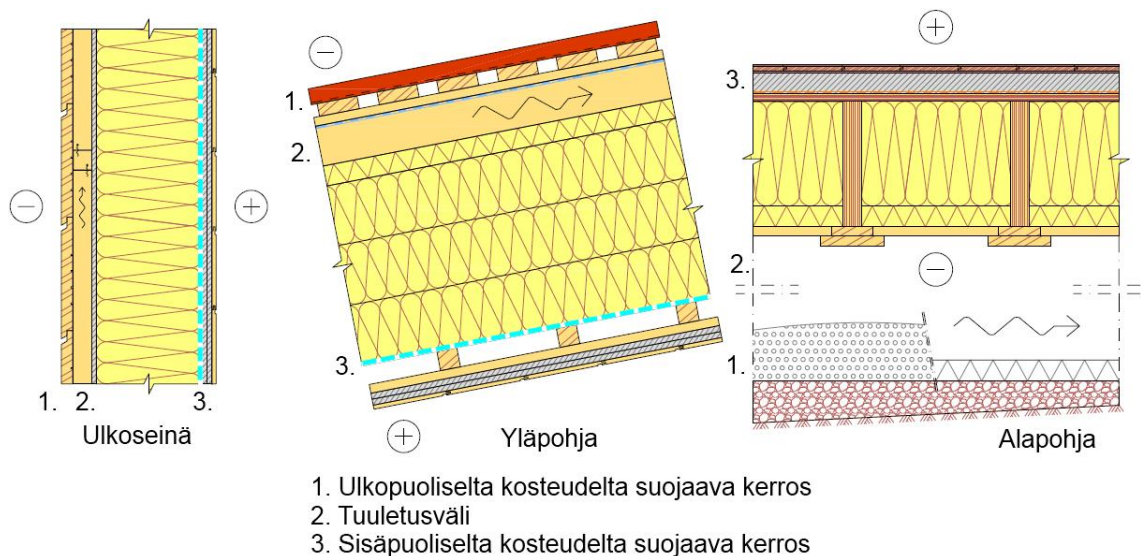


Kuva 3.16. Kosteuden sitoutuminen puusolukkoon [28]

Pitkäaikainen liiallinen kosteus aiheuttaa puun lahoamista ja homehtumista. Lahoamisen seurauksena puun lujuus heikkenee ja ihmisten terveydelle haitallinen homehtuminen alkaa. Lisäksi puu kutistuu kuivuessaan ja turpoaa kostuessaan. Kosteusmuodonmuutokset ovat puun anisotrooppisuudesta johtuen syiden suuntaan todella pieniä verrattuna poikittaisiin suuntiin. Syiden suuntainen kutistuma puun kuivuessa on noin 0,2 prosenttia ja tilavuuden kutistuminen saattaa olla 12 prosenttia. [4, s. 43]

3.4.2 Kosteusteknisesti toimivat rakenteet

Puukerrostalon kosteusrasitettujen ulkovaipparakenteiden kosteustekninen toimiminen varmistetaan estämällä rakennuksen ulko- ja sisäpuolisen kosteuden pääsy rakenteisiin. Rakenteet on suojattava suoralta ulkopuoliselta kostumiselta ulkopinnalla, joka on erotettu sisäpuolisista rakenteista tuulettuvalla ilmavälillä. Tuuletusvälin sisäpuolella tulee olla kosteutta kestävä tuulensuojakerros. Sisäpuolisen kosteuden pääsy rakenteisiin pitää estää kerroksella, joka riittävästi vastustaa ilman sisältämän veden diffuusiota sisätiloista rakenteisiin. Sisäpuolista kerrosta sanotaan höyrynsuluksi. [29] Kuvassa 3.17. on kolme rankarakenteisen puukerrostalon ulkovaipan rakennetyyppiä, jotka toteuttavat edellä mainitut kosteustekniset vaatimukset.



Kuva 3.17. Kosteusteknisesti toimivat puukerrostalon ulkovaipparakenteet [24]

Kuvan vasemmanpuoleisessa ulkoseinäarakenteessa suoran ulkopuolisen kosteuden eli sadeveden pääsy rakenteisiin on estetty puisella ulkoverhouksella, jonka sisäpuolella on tuuletusväli. Tuuletusvälin sisäpuolella on kosteutta kestävä tuulensuojakipsilevy. Ulkoverhouksen valinnassa on huomioitava sen riittävä vesitiiveys, jotta sen läpi ei siirry suuria määriä kosteutta. Maalattu ulkoverhouspaneeli on riittävän tiivis, mutta esimerkiksi huokoinen julkisivutiilimuuraus ei ole. Tiilimuurauksen taakse pitää asentaa erillinen lisäsuojakerros esimerkiksi teräsohutlevyistä. [29, s. 27] Sisäpuolisen kosteuden diffuusio estetään erillisellä höyrynsulkumuovilla.

Keskellä oleva yläpohjarakenne on periaatteeltaan ulkoseinäarakenteen kaltainen. Sadevesisuoja toimii erillinen vesikate yhdessä sen alle asennettavan muovisen aluskatteen kanssa. Aluskatteen molemmiin puolin on tuuletusväli. Aluskatteen alapuolinen tuuletusväli rajoittuu tuulensuojalevyyn. Sisäpuolisen kosteuden pääsyn rakenteisiin estää höyrynsulkumuovi.

Kuvan alapohjarakenteen ulkopuolisena kosteuslähteenä on mörästä maasta nouseva kosteus. Maakosteutta vastaan suojaavana kerroksena toimii maapohjan lämmöneristekerros, joka jäädyttää maata ja siten vähentää sieltä diffuusiona tulevan kosteuden määrää. [29, s.79] Maapohjan lämmöneristekerroksen yläpuolella on tuuletusväli, jonka

yläpuolella on kosteutta hyvin kestävä tuulensuojalevy. Alapohjarakenteeseen ei tarvita erillistä höyrynsulkumuovia, koska siinä olevalla betonipintavalulla on suuri vesi-höyrynvastus eli se toimii rakenteellisena höyrynsulkuna.

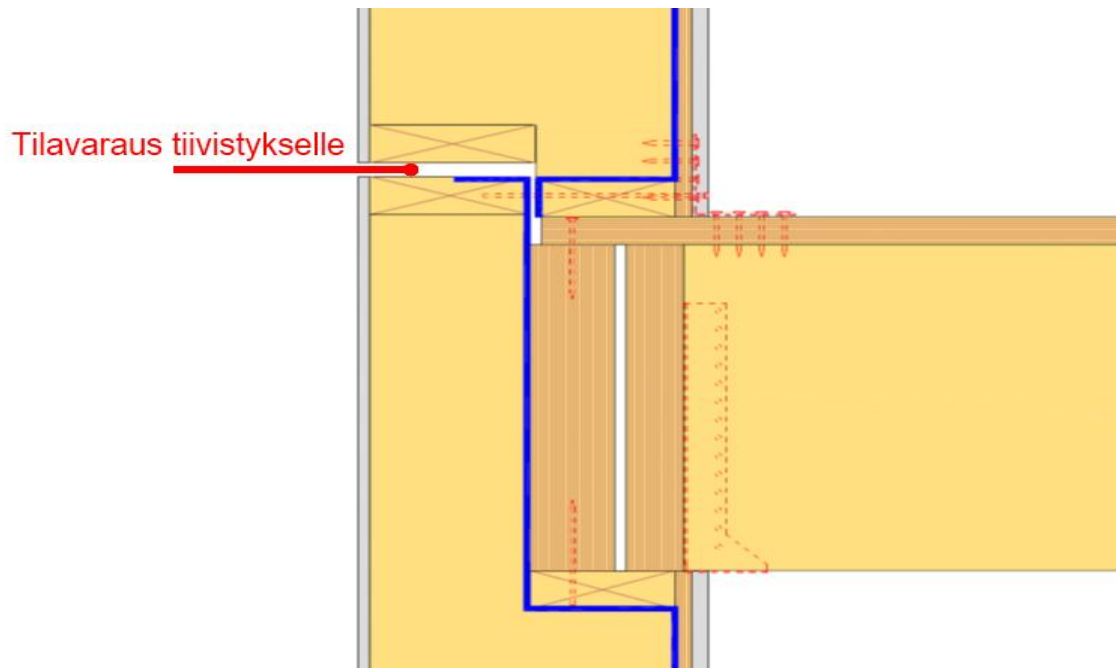
Koko puukerrostalon tiiveyden ja kosteusteknisen toimivuuden kannalta avainasemassa on höyrynsulun yhtenäisyys. Höyrynsulku toimii oikein vasta, kun se on yhtenäinen koko rakennuksen vaipan osalta. Yhtenäisyyden kannalta ongelmallisimpia kohtia ovat rakenteiden väliset liitokset, joissa höyrynsulun riittävä tiivistäminen on perinteisin menetelmin vaikeaa.

Perinteinen menetelmä on puurakenteisissa pientaloissa käytetty teippaus. Höyrynsulku ja sen läpi menevät rakenteet tiivistetään teipin avulla. Teippaaminen on hidasta, ja riittävän tiiviiden liitosten tekeminen on käytännössä mahdotonta. Kuvassa 3.17. on pientalon ulkoseinän ja välipohjan liitos, jossa välipohjapalkit lävistävät höyrynsulun. Höyrynsulkua ei saada läpivientien takia millään tiiviiksi, ja teippaaminen vie todella paljon aikaa.



Kuva 3.18. Pientalon välipohjaliitos [30]

Nykyaikaisen elementtirakenteisen puukerrostalon runko nousee nopeasti, elementtien välisiä liitoksia on paljon ja höyrynsulun pitää olla rakenteiden pitkäaikaiskestävyyden takia hyvin tiivis. Puukerrostaloissa ei voi siten käyttää teippiliitoksia. Kuvassa 3.19. on nykyaikaisen puukerrostalon toimiva välipohjaliitos.



Kuva 3.19. Puukerrostalon välipohjaliitos [30]

Kuvassa ulkoseinän ja välipohjan liitoksessa sinisellä esitetty höyrinsulku kiertää välipohjan kantavat rakenteet. Seinäelementtien välillä höyrinsulkua ei teipata. Se tiivistetään ulkokautta erillisellä tiivistysmassalla. Tiivistysmassa pursotetaan ulkoseinäelementtien välillä olevaan kuvassa esitettyyn rakoon.

Kaikista rakenteellisista toimenpiteistä huolimatta puun kostumista ei pystytä kokonaan estämään ilman ja puun välisen diffuusion vuoksi. Siksi puukerrostalon rakenteet on suunniteltava aina siten, että ne sallivat puun kosteusliikkeistä johtuvat pienet muodonmuutokset. Mikäli rakenteiden suoran kostumisen suojaus toteutetaan kuvan 3.17. ulkoseinän mukaisesti puusta, on sen kosteusliikkeet otettava erityisesti huomioon.

3.4.3 Lämpötekniset ominaisuudet

Puun lämmönjohtavuus on suhteellisen huono. Se on kolminkertainen lämmöneristysvillan verrattuna, mutta vain yksi kahdestoistaosa betonin lämmönjohtavuudesta. Puuta voidaan siten käyttää lämmöneristyskerroksessa, koska se ei aiheuta merkittävää kylmäsiltaa rakenteeseen. Puun lämmöstä johtuvat muodonmuutokset ovat pieniä ja lisäksi kosteustekniset muodonmuutokset kompensoivat niitä. Lämpölaajenemista ei tarvitse ottaa huomioon muissa kuin alle 0 °C:n lämpötiloissa, jolloin puuhun saattaa syntyä pakkashalkeamia. [4]

4 TEOLLINEN PUUKERROSTALORAKENTAMINEN

4.1 Moderni puukerrostalo

4.1.1 Puukerrostalon maine

Puukerrostalojen rakentamisella on Suomessa yleisesti huono maine. Suomalainen rakentaja mieltää puukerrostalon kalliiksi ja huonosti rakennettavaksi. Kalleutta ja huonoa rakennettavuutta perustellaan 90-luvulla rakennettujen puukerrostalojen huonoilla rakentamiskokemuksilla.

Suomen ensimmäiset 90-luvun puukerrostalot rakennettiin betonikerrostaloissa käytettyjen rakentamistekniikoiden ja ulkomaisten esikuviansa mukaan. Suuri osa rakentamisesta tehtiin itse rakennuspaikalla. Teollisesti esivalmistettuja elementtejä käytettiin vähän, ja niiden valmiusaste oli erittäin matala. Ne sisälsivät parhaimmillaankin vain rungon ja eristeet. Edellä mainittujen asioiden johdosta puukerrostalon työmaalla tapahtuva rakentaminen vei paljon aikaa, jolloin rakenteilla oleva puukerrostalo joutui väkisin erilaisten vuodenaikojen ja sääolosuhteiden armoille. Näin ollen kaikki paljaat puurakenteet piti sääsuojata, koska ne eivät kestä vaativia kosteusrasituksia.

Massiivisten sääsuojausvaatimusten lisäksi ensimmäisten puukerrostalojen korkeaa hintaa ja huonoa rakennettavuutta edisti avoimen puurakentamisjärjestelmän puuttuminen. Eri runkovaihtoehtojen ja rakennusosien kilpailuttaminen oli vaikeaa, ja työmaalla jouduttiin miettimään liitokset aina kohdekohtaisesti uudelleen, koska vakioituja liitosperiaatteita ei ollut. [31]

4.1.2 Lean-rakentaminen

Lean on maailmalla laajasti käytössä oleva asiakaslähtöinen johtamis- ja kehittämisfilosofia. Siihen sisältyy keskeisesti tinkimätön laatuajattelu, jossa tehdään kaikki mahdollinen lopputuotteen ja toiminnan laadun varmistamiseksi. Laatuvastuu kuuluu kaikille työntekijöille. Lean-toimintamalli on alun perin kehitetty autoteollisuuteen, mutta sen periaatteita on sovellettu lukuisissa eri alojen yrityksissä. Lean-periaatteita noudattavat yritykset ovat tavallisesti toimialansa kannattavimpia. [32, s.6]

Rakentamisprosessi on kokonaisuus, johon kuuluu rakennuttaminen, rakennuksen suunnittelu ja rakentaminen. Lean-rakentaminen on sekä koko rakentamisprosessin että sen yksittäisten osien johtamista ja kehittämistä Lean-toimintamallin avulla. Lean-rakentamisen lähtökohtana on lopputuotteen eli valmiin rakennuksen arvo. Arvo määritellään aina asiakasnäkökulmasta. Se tarkoittaa niiden ominaisuuksien määrittelyä, jois-

ta asiakas on valmis maksamaan. [32, s. 8] Asiakaslähtöisten ominaisuuksien erittelyn avulla ohjataan rakentamisprosessin kehitystoiminta oikeisiin asioihin.

Erittelyn johdosta rakentamisprosessin arvoketju voidaan kuvata eli rakentamisprosessista voidaan määritellä ne osat, joissa asiakkaille tärkeät ominaisuudet realisoituvat. Arvoketjun kuvauksen avulla löydetään arvoa tuottavat ja arvoa tuottamattomat toiminnot. Arvoa tuottavia toimintoja tehostetaan ja kokonaan arvoa tuottamattomat toiminnot lopetetaan. [32, s.8]

Lean-rakentamisessa toimintojen tehostaminen ei perustu työtahdin kasvattamiseen. Se perustuu erilaisten hukkien poistamiseen. Hukalla tarkoitetaan kaikkea turhaa ja arvoa lisäämätöntä työtä. Hukan vähentäminen onnistuu työympäristön turvallisuuden ja terveellisyyden lisäämisellä, työn systemaattisella jatkuvalla parantamisella ja työn vakiinnuttamisella. [32]

Rakentamisen kannalta hukan poistaminen tarkoittaa kaiken mahdollisen rakentamistyön siirtämistä työmaalta tehtäisiin. Tehtaan työympäristö on aina valoisa, lämmin ja työmaaympäristöön verrattuna siisti ja ergonominen. Jatkuva systemaattinen parantaminen ja työn sekä työtapojen vakiinnuttaminen on helppoa valvotuissa ja yhtenäisissä työskentelyolosuhteissa. Lopputuotteen kannalta tärkeä laadunvarmistus on myös helpompaa tehdasolosuhteissa, joissa virheet pystytään havaitsemaan, raportoimaan ja niihin pystytään vaikuttamaan paremmin.

Yksittäisten toimintojen tehostaminen kuitenkin tehostaa teollista rakentamista vasta, kun ne saadaan toimimaan eheästi keskenään. Yksittäisten toimintojen yhtenäistämistä kutsutaan virtauttamiseksi. Sen ansiosta rakennuselementtejä voidaan valmistaa vain tilauskannan mukaan. Näin saadaan varastot ja keskeneräinen tuotanto pidettyä mahdollisimman pieninä. Toimintojen virtauttamisella saavutetaan lyhempiä toimitusaikoja, varastoihin sitoutuneen pääoman pienenemistä, laadun kehittymistä, tuottavuuden kasvua ja systemaattisen toiminnan kasvua. [32]

Koko rakentamisprosessin hukan poistaminen tarkoittaa koko prosessin virtauttamista. Se on yhteistyön lisäämistä kaikkien osapuolten välillä, pitkäaikaista kumppanuutta ja liian kilpailutuksen poistamista. Työn systemaattinen jatkuva parantaminen ja työn vakiinnuttaminen onnistuvat vain siten, että samalla rakentamisorganisaatiolla tehdään monta yhteistä projektia. Liika kilpailutus ja osapuolten jatkuva vaihtaminen johtavat siihen, että toimintamallit pitää aina omaksua ja opetella uudelleen. Silloin tehdään vain yksittäisiä urakoita koko projektin sijaan.

4.1.3 Kilpailukykyinen puukerrostalo

Tehokas ja kustannuksiltaan kilpailukykyinen puukerrostalotuotanto on mahdollista saavuttaa vain Lean-toimintamallin edellyttämän teollisen rakentamisen kautta. Työmaalla tapahtuva rakentaminen on käytännössä vain tehtaalta tulevien valmisosien liittämistä yhteen. Teollisen puukerrostalotuotannon avainsanat ovat Lean-rakentaminen, modulaarisuus ja rakennettavuus. [33]

Modulaarisuus tarkoittaa sitä, että rakennus koostuu itsenäisistä, teollisesti valmistettavista moduuleista eli elementeistä. Elementit sisältävät lähes kaikki valmiilta loppu-

tuotteelta vaadittavat yksityiskohtaiset ominaisuudet, joita ovat esimerkiksi valmiit, viimeistellyt seinäpinnat ja tekniset asennukset. Modulaarisuus on sekä osa lopputuotetta eli valmista puukerrostaloa että koko sen rakentamisprosessia. Modulaarisuudesta saatavan maksimaalisen lisäarvon savuttamiseksi tärkein asia on moduuleiden monipuolisuuden kehittäminen. Monipuolisuus tarkoittaa ulkoisten ominaisuuksien monimuotoisuutta. Se saavutetaan avoimella rakentamisjärjestelmällä, joka standardisoi moduuleiden sisäiset ominaisuudet, kuten niiden väliset liitokset. Sisäisistä ominaisuuksista aiheutuvien ristiriitojen poistuminen lisää niiden ulkoista monimuotoisuutta, koska silloin esimerkiksi eri valmistajien moduulit ovat yhteensopivia keskenään. [33]

Rakennettavuus on tehokkaan puukerrostalorakentamisen kolmas pääperiaate. Se on moduuleiden liittämistekniikoiden yksinkertaistamista ja rakennuksen työmaalla tapahtuvan kokoamisen kustannusten ja kokoamisajan vähentämistä. Modulaarisuuden tavoin rakennettavuus on osa lopputuotetta ja koko rakentamisprosessia, mutta sitä voidaan pitää enemmänkin maalina tai tavoitteena, ja modulaarisuus on keino päästä tähän tavoitteeseen. Rakennettavuus saavutetaan standardisoinneilla eli avoimella rakentamisjärjestelmällä ja mahdollisimman esivalmistetuilla moduuleilla. [33]

4.1.4 Elementtitekniikan kehitys Suomessa

Suomen talonrakentaminen oli aina toiseen maailmansotaan asti lähes kokonaan paikalla rakentamista. Talot rakennettiin alusta loppuun työmaalla ilman minkäänlaisia valmisosia. Rakennusten runko nousi hitaasti, ja työtä jouduttiin tekemään usein huonoissa olosuhteissa erilaisten sääolosuhteiden armoilla. Sodan jälkeinen teollistuminen, kaupungistuminen ja jälleenrakentaminen yhdistettynä huonoon taloudelliseen tilanteeseen pakottivat talonrakentamisen tehostumaan. [34] Tehokkaaksi ja taloudelliseksi rakennustavaksi keksittiin modulaarinen rakentaminen eli elementtitekniikka. Elementtitekniikka on rakennustekniikka, jossa talo kootaan työmaalla tehdasvalmisteisista valmisosista eli elementeistä.

Elementtien käyttö yleistyi 1940- ja 50-lukujen vaihteessa, jolloin elementtejä alettiin käyttää laajamittaisesti asuintalojen rakentamisessa. Pientaloissa käytettiin puuelementtejä ja kerrostalot koottiin palomääräysten rajoittamina betonielementeistä. Suomen tunnetuin varhainen kokonaan elementeistä rakennettu kerrostalo on Helsingin yliopiston Porthania-rakennus. [4, 34]

Kerrostalojen betonielementtirakentamista on sen jälkeen kehitetty systemaattisesti rakennusteollisuuden toimesta. 1960-luvun lopussa Suomessa otettiin käyttöön niin sanottu Betonielementtisysteemi eli BES-järjestelmä. Siinä standardoitiin betonielementit ja niiden väliset liitokset siten, että rakennusurakoitsijat pystyivät hankkimaan elementtejä samaan rakennukseen usealta eri toimittajalta. Suomeen oli syntynyt yhtenäinen, avoin betonikerrostalojen rakentamisjärjestelmä, joka antoi suuria vapauksia muun muassa rakennusten pohjaratkaisuille. Betonielementtirakentamisen kehittämistä jatkettiin yhä ja 80-luvulla laadittiin Runko-BES, joka on toimitila- ja teollisuusrakennusten mitat, rungon ja liitokset standardisoiva järjestelmä. [34] Suomen vankka kerrostalojen

betonielementtirakentamiskulttuuri on perustunut näihin avoimiin betonielementtijärjestelmiin ja kivirakenteita suosiviin palomääräyksiin.

Puuelementtejä on käytetty aina 2000-luvulle asti vain pientalorakentamisessa, jossa elementit ovat niiden vähäisestä rakennuskohtaisesta lukumäärästä johtuen tulleet vain yhdeltä toimittajalta. Näin ollen yhtenäiselle avoimelle puuelementtistandardille ei ole ollut tarvetta.

Ympäristökysymysten merkityksen kasvamisen, valtiovallan panostusten sekä perinteisen puualan työllisyyden supistuessa Suomen puuteollisuusklusteri on aloittanut Teollisen puuelementtirakentamisen tutkimusohjelman vuonna 2010. Ohjelman tavoitteena on kehittää suurimittakaavaiselle puurakentamiselle sovitettut, optimoidut ja teolliset tekniset ratkaisut, joiden avulla luodaan perusteet uusille kansainvälisestikin menestyville liiketoimintamalleille. Vuoden 2012 lopussa ohjelman tuotoksena julkaistiin avoimen puuelementtistandardin ensimmäinen versio Runko-PES 1.0, joka aikaisempien betonielementtisysteemien tapaan yhtenäistää puukerrostalorakentamisessa käytettävät mitat, liitosperiaatteet ja perusrakenneratkaisut. [35]

4.1.5 Puuelementtien terminologiaa

Puurakentamisessa käytetyt elementit on perinteisesti jaettu niiden koon ja valmiusasteen mukaan. Valmiusasteen perusteella elementit ovat olleet runko- tai täyselementtejä ja koon mukaan pien- tai suurelementtejä. Runkoelementti on tarkoittanut moduulia, joka sisältää vain kantavan ja jäykistävän rungon. Täyselementtinä on pidetty kantavan ja jäykistävän rungon lisäksi eristeet sisältävää elementtiä. [36, s. 15]

Modernit puukerrostalot rakennetaan Suomen sääoloissa pitkälle esivalmistetuista elementeistä, joiden valmiusaste on huomattavasti suurempi kuin vanhan elementtijaon mukaisella täyselementillä. Nykyaikaiset elementit jaetaan valmiusasteen perusteella siten, että runkoelementti on yksittäinen rakennuksen osa, kuten pilari, palkki tai katto-ristikko, ja esivalmistetut elementit ovat yleisesti elementtejä. Täyselementeistä ei juurikaan enää puhuta.

Koon mukainen jako pien- ja suurelementteihin on nykyäänkin käytössä. Pienelementti on sellainen moduuli, joka voidaan siirtää ja asentaa paikoilleen miesvoimin. [8, s. 68] Pienelementit ovat yhden kerroksen korkuisia seinäelementtejä tai lyhyiden jänneväliden välipohjaelementtejä. Pienelementit soveltuvat pientalojen rakentamiseen, ja puukerrostaloissa niitä käytetään vain erikoistapauksissa, kun rakennuksen pohjaratkaisu vaatii esimerkiksi lyhyiden seinäelementtien käyttöä.

Suurelementti on pienelementtiä huomattavasti suurempi ja painavampi valmisosa. Suurelementti asennetaan paikoilleen aina nostokalustolla. Puukerrostalojen suurelementit ovat yksittäisiä seiniä tai ala-, väli-, ja yläpohjan osia. [8, s. 69] Ala- ja välipohjissa suurelementtien pituus voi värähtelymitoituksen ja askeläänen siirtymän rajoittamana olla noin 7 metriä, mutta yläpohjissa voidaan käyttää yli 30 metriä pitkiä elementtejä. Yksittäiset seinäelementit ovat yleensä yhden kerroksen korkuisia, ja ne voivat olla jopa 16 metriä pitkiä. Kuvassa 4.1. on puukerrostalo, jonka ulkoseinät on rakennettu suurelementeistä.



Kuva 4.1. Puukerrostalon julkisivu suurelementeistä [37]

Kuvan ulkoseinäelementit ovat kerroksen korkuisia ja koko julkisivun mittaisia. Kuvasta huomataan, että elementit ovat hyvin esivalmistettuja. Julkisivupinnat ovat viimeistelyjä, jolloin työmaalla tehdään vain saumakohdat. Suurelementti on yleisin puukerrostaloissa käytetty elementti.

Puurakentamisessa käytettyjen pien- ja suurelementtien rinnalle on viime vuosisadan lopussa kehitetty tilaelementti. Tilaelementti on moduuli, jolla on tilavuus, eli se muodostaa tilan. Se muodostuu kantavasta rungosta ja sitä rajaavista pinnoista eli seinistä, lattiasta ja katosta. Tilaelementtitehtaalla seinät, lattia ja katto tehdään erikseen suurelementeiksi. Lopuksi ne yhdistetään toisiinsa, jolloin niistä muodostuu tilaelementti. Tilaelementti on teollisista puukerrostaloelementeistä esivalmistetuin. Se sisältää kaikki valmiit sisäpinnat, julkisivut ja talotekniikka-asennukset sekä tarvittavat kiinteät kalusteet, kuten keittiökoneet, -tasot ja kylpyhuonekalusteet. Kuvassa 4.2. on esitetty tilaelementin valmistus tehtaassa.



Kuva 4.2. Tilaelementin valmistus [38]

Tilaelementin valmistus alkaa kuvassa ylhäällä olevilla elementtilinjoilla, joissa rakennetaan suurelementteinä seinät, lattia ja katto. Erilliset elementit yhdistetään tilaelementiksi, jonka jälkeen ulko- ja sisäpinnat viimeistellään ja kiinteät kalusteet asennetaan. Valmis tilaelementti työnnetään ulos tehtaan ovista, ja sen jälkeen se kuljetetaan työmaalle.

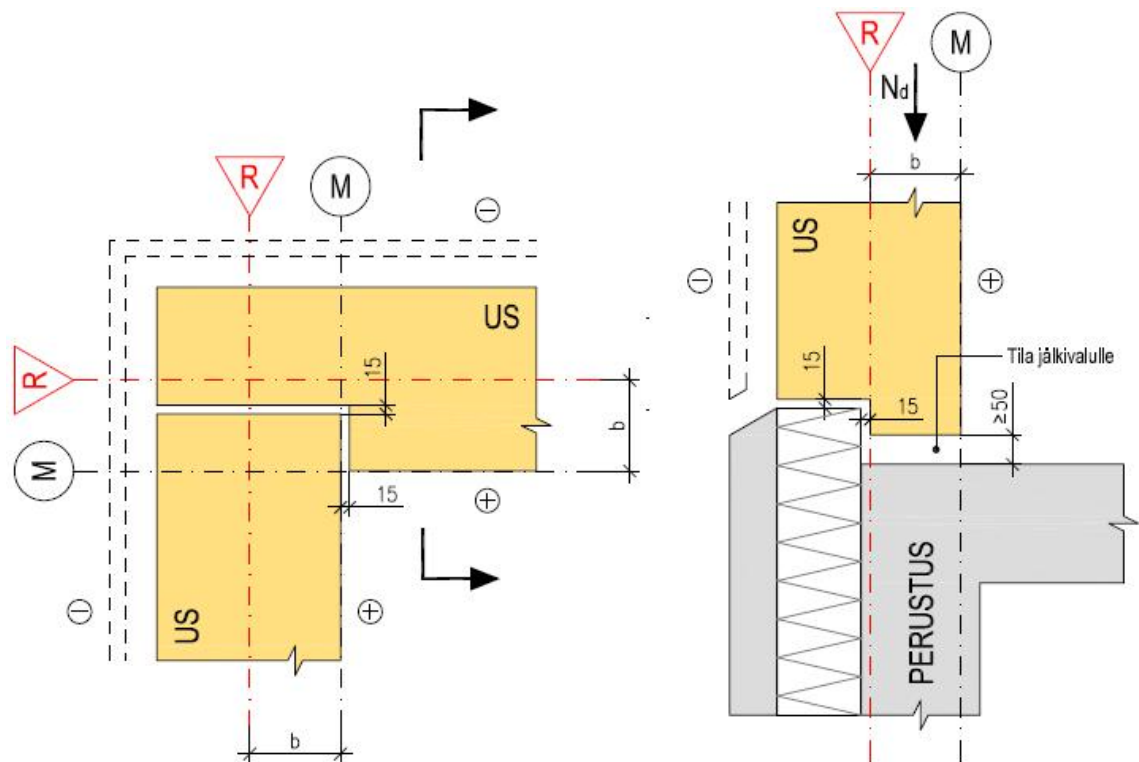
4.1.6 Runko-PES 1.0

Runko-PES eli Runkopuuelementtisysteemi on avoin puutalojen elementtirakentamisen standardoitu järjestelmä. Se soveltuu käytettäväksi erilaisiin puuelementtirakennuksiin käyttötavasta, koosta ja runkojärjestelmästä riippumatta. Systeemi mahdollistaa erilaisten ja eri elementtitoimittajien puurunkoelementtien käyttämisen samassa rakennusprojektissa. [35]

Runko-PES vakioi elementtien liitosperiaatteet, joihin kuuluu reunageometria sekä kiinnitys- ja tiivistysperiaatteet. Runko-PES:ssä vakioidaan myös elementtien valmis-

tustoleransseja. Liitosperiaatteet ja elementtien valmistuksen mittatoleranssit vakioidaan systeemin ensimmäisessä versiossa vain suurelementtien välillä. Tilaelementtien välisiä liitoksia tai niiden mittatoleransseja ei esitetä. [35]

Erillistä mittajärjestelmää systeemissä ei betonielementtisysteemien tapaan esitetä, mutta moduuliviivojen asema suhteessa rakenteeseen on vakioitu. Moduulijärjestelyn toteuttamiseen Runko-PES tuo uuden R-moduuliverkoston. Arkkitehti suunnittelee ja mitoittaa rakennuksen normaaliin tapaan valmiita sisäpintoja pitkin menevien M-moduulilinjoihin mukaan ja rakennesuunnittelija R-moduulilinjoihin mukaan, jotka ovat elementtien asennuslinjoja. M- ja R-moduulilinjoihin sijainti suhteessa rakenteeseen on esitetty kuvassa 4.3. Moduuliverkostojärjestely sopii käytettäväksi kaikkien erilaisten puukerrostalon elementtien kanssa. [35]



Kuva 4.3. Moduulilinjoihin sijaintiperiaate [35]

Kuvasta nähdään, että M-moduulilinja menee seinien sisäpintojen mukaan, jolloin sen avulla on helppo mitoittaa tilojen koko. R-linja sijaitsee asennuslinjalla, joka kuvan ulkoseinäelementissä tarkoittaa sen osion takapintaa, joka muodostaa elementin ylä- ja alapäässä olevan loveuksen. [35]

Rakennepaksuuksia, jännemittoja ja kerroskorkeuksia Runko-PES ei vakioi. Niille se antaa suosituksia ja ohjeita. Puukerrostalojen kokonaisjäykistyksen pääperiaatteet esitetään järjestelmässä. Elementtien rakennekerroksiin, kerrosten materiaaleihin tai elementtien valmiusasteeseen systeemi ei ota kantaa. Lisäksi Runko-PES esittää esimerkkejä puukerrostalon erilaisista rakennetyypeistä ja liitoksista. [35]

Luvussa 4.1.4 mainittu teollisen puuelementtirakentamisen tutkimusohjelman toinen osa käynnistyy vuoden 2013 aikana. Sen yhtenä keskeisimpänä asiana on edelleen ke-

hittää ja yhtenäistää puukerrostaloissa käytettyjä teknisiä ratkaisuja. Kehitystyön tuloksen tullaan julkaisemaan paranneltu versio Runko-PES:stä.

4.2 Massiivipuun käyttö puukerrostaloissa

4.2.1 Vanhassa vara parempi

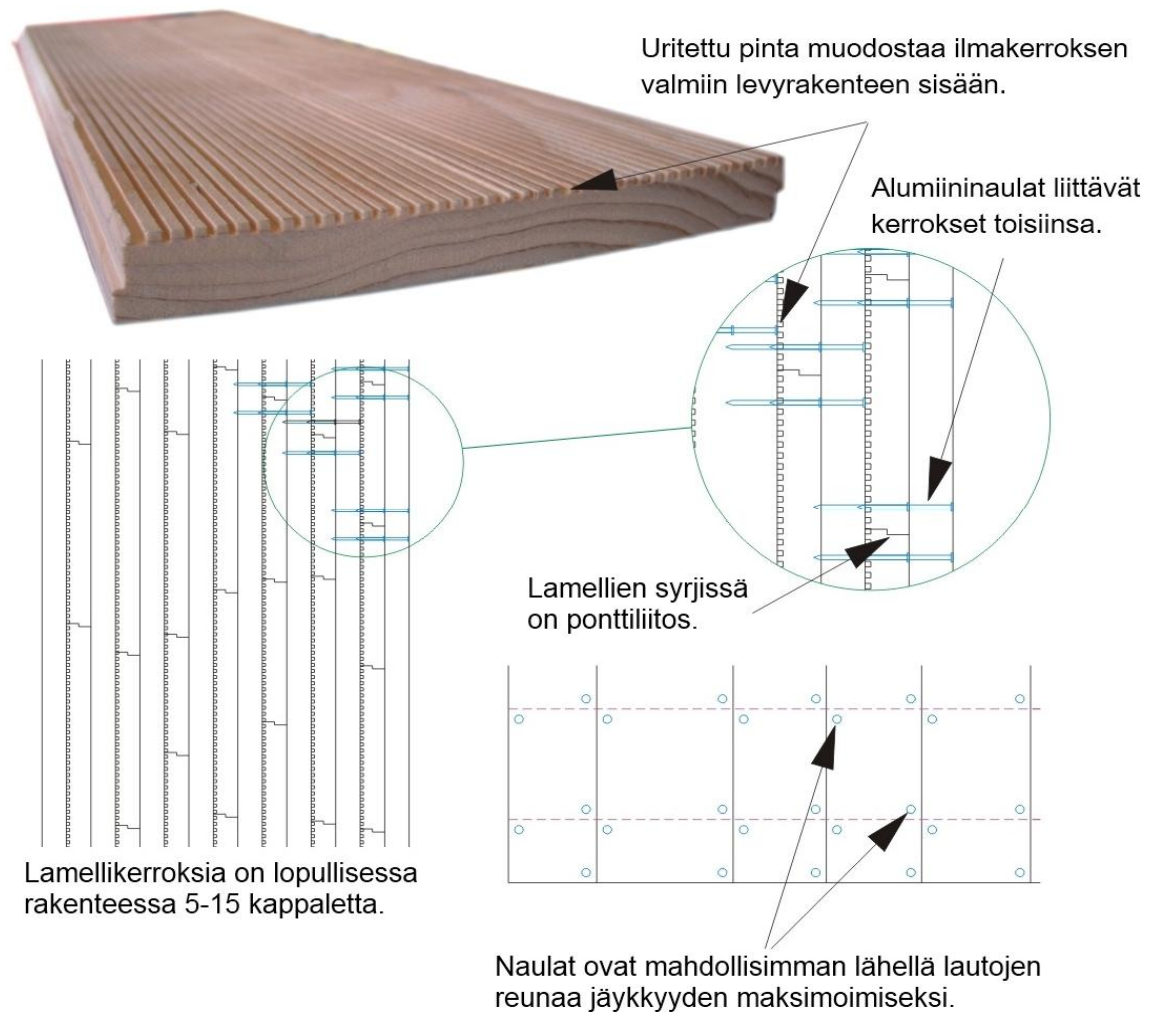
Massiivipuurakenne tarkoittaa rakennetta, joka on täyttä puuta. Vanhin massiivipuurakenne on 10 000 vuotta sitten ensimmäisissä puutaloissa käytetty hirsirakenne. Massiivisten hirsirakenteiden käyttö pääasiallisena puisten asuinrakennusten rakennusmateriaalina loppui rankarakennustekniikan kehittymisen myötä Keski-Euroopassa satoja vuosia sitten. Suomessa 1940-luvun jälkeen massiivisia puurakenteita on käytetty lähinnä yksittäisten pientalojen rakentamisessa.

Keski-Euroopassa 90-luvulla kehitettyjen uusien sovellusten myötä massiiviset puurakenteet ovat tulleet uudelleen ajankohtaisiksi asuinrakennusten rakentamisessa. Uudet massiivipuurakennesovellukset ovat sahatavarasta liimaamalla tai mekaanisilla liitoksilla koottuja pysty- tai vaakatasoon asennettavia elementtejä, joita käytettiin aluksi vain pientalorakentamisessa. Puukerrostalorakentamiselle 2000-luvulla avautuneiden mahdollisuuksien ansiosta uudenlaisia massiivipuurakenteita on alettu käyttää myös puukerrostalojen runkomateriaalina. Suomen ensimmäinen massiivipuukerrostalo on Espooseen vuonna 2013 valmistunut Suomen luontokeskus Haltia. [3]

4.2.2 Puukerrostalojen massiivipuuelementit

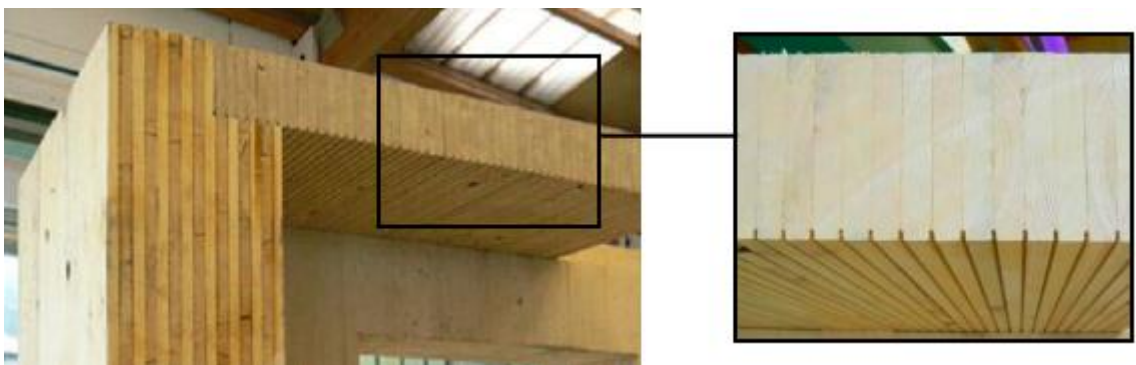
Puukerrostaloissa käytetyt massiivipuurakenteet ovat levymäisiä, kerroksellisia rakenteita. Levyistä jatkojalostetaan valmiita, aukot, eristeet ja pintamateriaalit sisältäviä rakennuselementtejä, joista puukerrostalo kootaan. Rakenteen massiiviosa toimii kantavana ja jäykistävänä rakenteena. Massiivipuuelementtejä voidaan käyttää puukerrostalojen kaikissa rakenneosissa. Massiivipuulevyjä on olemassa käytännössä kahta eri tyyppiä, joita erottaa niiden sisäinen liitostekniikka.

Massiv Holz Mauer (MHM) on Saksassa kehitetty tuotemerkki. MHM on ristikkäisistä alumiininauloilla yhteen liitetyistä sahatavarakerroksista muodostuva puulevy. Kerrokset muodostuvat kuvan 4.4. esittämistä 23 mm paksuista lamelleista, joiden leveys vaihtelee 95 mm ja 250 mm välillä. Lamellit uritetaan, jolloin valmiin rakenteen sisään muodostuu ilmakerroksia, jotka parantavat rakenteen lämmöneristysominaisuuksia. Lamellikerroksia on pariton määrä, jolloin uloimmat kerrokset ovat aina samaan suuntaan. Kerrosten lukumäärä vaihtelee viiden ja viidentoista välillä. [39]



Kuva 4.4. MHM-rakenne [39]

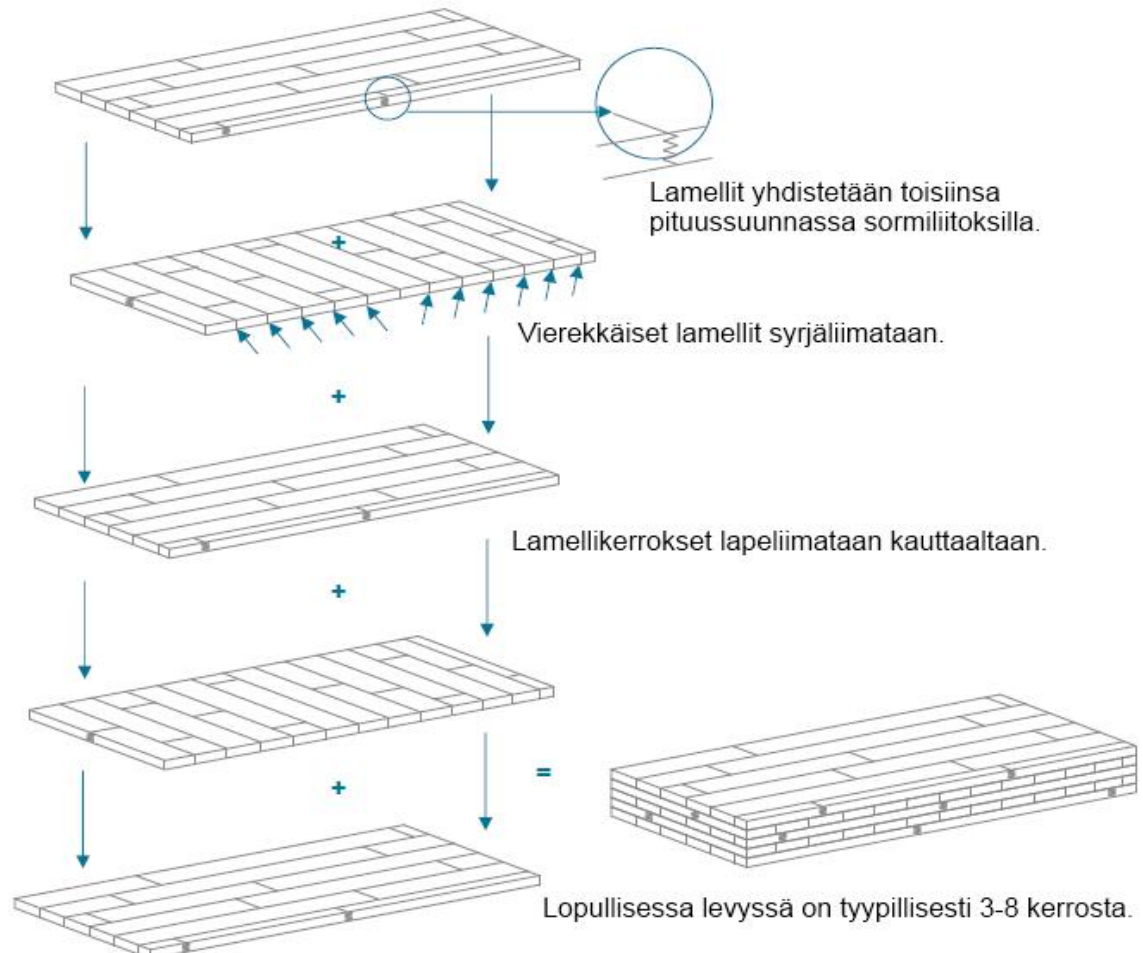
MHM-levyä käytetään puukerrostalojen pystyrakenteissa. MHM-pystyrakenteisiin yhteensopiva vaakarakenne on Profil Holz Elemente (PHE). PHE on MHM-levyn sisärakente. Se on 250 mm leveistä profiiliin höylätyistä lamelleista koostuva 1 200 mm leveä levy. Lamellit liitetään toisiinsa alumiininauloilla. Kuvassa 4.5. on osa PHE-rakenteista välipohjaa ja sen liitos MHM-seinäelementtiin. [39]



Kuva 4.5. PHE-rakenne [39]

Toinen puukerrostalojen massiivipuurakenne on nimeltään Cross Laminated Timber (CLT). CLT on yleisnimi ristikkäisistä liimaamalla yhteen liitetystä sahatavarakerroksista muodostuvalle puulevyille. Kerroksen paksuus on valmistajasta riippuen 20–75 mm

ja yhden lamellin leveys vaihtelee MHM-lamellien tapaan 95 mm ja 250 mm välillä. CLT-levyissä ei käytetä lainkaan mekaanisia liitoksia. Lamellit syrjä- ja lapeliimataan toisiinsa kuvan 4.6. osoittamalla tavalla. Pituussuunnassa lamellit liimataan sormiliitoksella. [39] CLT-rakenteita on olemassa useita tuotemerkkejä, joista tunnetuin on Stora Enso Oyj:n lanseeraama CLT. Muita ovat esimerkiksi X-Lam tai KLH.



Kuva 4.6. CLT-rakenne [40]

CLT-levyjä käytetään puukerrostalojen vaaka- ja pystyrakenteissa. CLT-levyjen uloimmat kerrokset ovat aina samansuuntaisia, mutta muiden kerrosten suunta määräytyy levyn käyttötarkoituksen mukaan. Pystykuormaa välittävissä rakenteissa ei yleensä ole kahta peräkkäistä samansuuntaista kerrosta. Yhteen suuntaan kantavissa vaakarakenteissa sen sijaan pääosa lamellikerroksista liimataan kantavan suunnan mukaisesti. Näin parannetaan levyn taivutuskestävyyttä. Suurin osa massiivipuurakenteilla toteutetuista puukerrostaloista on rakennettu CLT-tekniikalla. Esimerkiksi Isoon-Britanniaan valmistui vuonna 2010 kahdeksankerroksinen puukerrostalo, jonka kaikki kantavat rakenteet ovat perustuksia lukuun ottamatta CLT-levyjä. [40]

4.2.3 Hyödyt ja haitat

Massiivipuelementeissä on paljon puuta, joten niiden raaka-ainekustannukset tulevat suuriksi verrattuna rankarakenteiseen elementtiin. Lisäksi Suomessa ei ole yhtään

massiivipuuelementtitehdasta. Lähimmät sijaitsevat Keski-Euroopassa. Niinpä logistiset kustannukset ovat suuria. Edellä mainittujen syiden johdosta massiivipuuelementtien käyttö ei ole matalissa puurakennuksissa suositeltavaa, kun vaihtoehtona on perinteinen pientaloissakin käytetty rankarakenne-elementti.

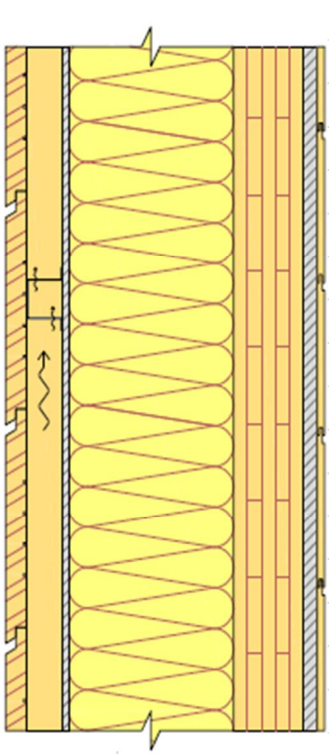
Puukerrostalon rakenteita kuormittavat voimat kasvavat kerrosten lisääntyessä. Korkeilla puukerrostaloilla rankarakenteisten elementtien käyttö edellyttää rankojen vuoraamista jäykistävin levyrakentein ja erilaisten kuormia siirtävien teräsrakenteiden käyttöä sekä erilaisten insinööripuutuotteiden käyttöä sahatavaran sijaan. Rankarakenne-elementtien käytön järkevä kerroksellinen yläraja on 4–5 kerrosta.

Massiivipuuelementti on hyvin jäykkä ja ristikkäisten lamellikerrosten ansiosta erisuuntaisia kuormia hyvin kestävä rakenne. Alimmille kerroksille tulevat pystykuorimitukset ja tuulesta aiheutuvat rakennusta kaatavat vaakakuorimitukset pystytään hyvin siirtämään massiivipuukerrostalossa perustuksille. Siksi massiivipuuelementtien käyttö on suotavaa korkeissa puukerrostaloissa.

Massiivipuulla on lujuusominaisuuksien lisäksi hyviä kosteusteknisiä ominaisuuksia, joita voidaan hyödyntää. Ristikkäisten lamellikerrosten takia massiivipuun kosteudesta johtuvat muodonmuutokset ovat paremmin hallittavissa, koska lujat puun syysuuntaiset kerrokset estävät viereisten kerrosten syitä vastaan kohtisuoran kosteusliikkeen.

Toinen kosteustekninen etu liittyy höyrynsulkuun. Rankarakenteisten puukerrostalojen ulkovaipassa tarvitaan pääsääntöisesti höyrynsulku, jotta sisäilman kosteus ei siirry rakenteisiin. Yleisenä mitoitusperusteena käytetään sääntöä, jonka mukaan ulkoseinärakenteessa tarvitaan höyrynsulku, jos ulkoseinän sisäpinnan vesihöyrynvastuksen suhde ulkopinnan vesihöyrynvastukseen on alle 5. Taulukkoon 4.1. on laskettu eri paksuisten CLT-rakenteiden ulkoseinien sisä- ja ulkopintojen höyrynvastuksia. Seinän ulkopintana pidetään tuuletusrakoon rajoittuvaa pintaa, jossa on 9 mm paksu tuulensuojakipsilevy. Sisäpinnassa on kipsilevyllä päällystetty CLT-levy.

Taulukko 4.1. CLT-rakenteen vesihöyrynvastus [24, 40, 41]

Tuulensuojakipsilevy		CLT-levy			Höyrynvastusten suhde
Paksuus	Vesihöyrynvastus	Paksuus	Vesihöyrynvastus		
b (mm)	$Z_{v,kl}$ (s/m)	b (mm)	$Z_{v,CLT}$ (s/m)		$Z_{v,CLT}/Z_{v,kl}$
9	3,00E+03	60	4,80E+04		16
9	3,00E+03	80	6,40E+04		21
9	3,00E+03	90	7,20E+04		24
9	3,00E+03	100	8,00E+04		27
9	3,00E+03	120	9,60E+04		32
9	3,00E+03	140	1,12E+05		37
9	3,00E+03	160	1,28E+05		43
9	3,00E+03	180	1,44E+05		48
9	3,00E+03	200	1,60E+05		53
9	3,00E+03	220	1,76E+05		59
9	3,00E+03	240	1,92E+05		64
9	3,00E+03	260	2,08E+05		69
9	3,00E+03	280	2,24E+05		75
9	3,00E+03	300	2,40E+05		80
9	3,00E+03	320	2,56E+05		85

Taulukon oikeanpuoleiseen sarakkeeseen on laskettu ulkoseinän sisäpinnan ja ulkopinnan vesihöyrynvastuksien suhde eri CLT-levyn paksuuksilla. Suhde on ohuimmalla-kin 60 millimetrin CLT-rakenteella 16, joka ylittää selvästi arvon viisi. CLT-rakenteeseen ulkoseinään ei näin ollen tarvitse lainkaan erillistä höyrinsulkukerrosta. Sisäpinnan vesihöyrynvastuksena on laskennassa käytetty pelkän CLT:n vastusta. Todellisessa rakenteessa sisäpinnassa on tavallisesti taulukon kuvassakin oleva palon-suojakipsilevy, joka entisestään parantaa sisäpinnan höyrynvastusta.

5 PUUKERROSTALON BETONI- JA TERÄS- RAKENTEET

5.1 Betonirakenteet

5.1.1 Perustukset

Maa on aina sateen jälkeen pitkän aikaa kostea. Pohjaveden korkeudesta riippuen maa saattaa olla jatkuvasti kostea. Kesäisin maa on kosteuden lisäksi lämmin, jolloin ympäristö on otollinen erilaisten lahottajamikrobien kasvulle. Muina vuodenaikoina lämpötilan vaihdellessa erilaiset pakkasrasitukset aiheuttavat maahan pakkovoimia.

Kerrostalon perustusten pitää siirtää suuria viiva- ja pistekuormia maahan tai paaluille. Lisäksi kerrostaloa rasittavat vaakakuormat voivat talon korkeudesta ja ympäristön olosuhteista riippuen aiheuttaa perustuksiin nostavia voimia, joiden hallitsemiseksi vastapainona toimivien perustusrakenteiden pitää olla massiivisia.

Puu ei täytä maanvastaiselta rakenteelta tai perustuksilta vaadittuja ominaisuuksia. Puu on altis kosteudelle ja mikrobeille ja kestää huonosti erisuuntaisia voimia. Puurakenteella ei voi siirtää kerrostalojen suuria puristavia pystykuormia järkevästi maahan tai paaluille, ja puu ei voi toimia kevyenä materiaalina nostavien voimien vastapainona. Niinpä puukerrostalojen maanvastaisten rakenteiden ja perustusten on oltava betonia, joka kestää kosteutta, pystyy oikein raudoitettuna kestämaan suuria pistemäisiäkin kuormia ja on riittävän massiivista.

Puukerrostalojen pakollisia betonirakenteita ovat siten anturat, sokkelit, alapohjan maanvaraiset laatat sekä erilaiset maanpaineseinät ja perusmuurit. Lisäksi sivulla 15 taulukossa 3.3. esitettyjen palomääräysten mukainen kellarirakenteiden paloluokkavaatimus tarkoittaa sitä, että myös kellarirakenteiden on oltava betonia. Tuulettuvat alapohjat voidaan tehdä puurakenteisina, mutta ne ovat rakentamistekniikasta riippuen usein myös betonirakenteisia. Maanvaraisen ja tuulettuvan betonirakenteisen alapohjan tavaliset rakennetyypit on esitetty liitteessä 3.

Anturat ja maanvaraiset laatat ovat tavallisesti paikalla valettavia. Sokkelit ja maanpaineseinät voivat rakennuksesta riippuen olla betonielementtejä tai paikalla valettavia. Esimerkki puukerrostalon maanvaraisista rakenteista ja perustuksista on kuvassa 5.1.



Kuva 5.1. Puukerrostalon perustukset

Kuvan pilari-palkkirunkoisessa asuinpuukerrostalossa on paikalla valetut maanvaraiset anturat. Anturoiden väliin on ulkoseinälinjoille asennettu kuvassa näkyvät betonirakenteiset sokkeliementit. Kuvassa on asennettuna alapohjan lämmöneriste, lattia-lämmityspotket ja alapohjalaatan raudoitus. Alapohjan rakennetyyppi on siten maanvarainen betonilaatta.

Puukerrostalojen perustukset ja muut maanvaraiset rakenteet tehdään kuten betonikerrostaloissa. Ainoat puurakenteiden tuomat erityishuomiot liittyvät mittatoleransseihin ja vaakakuormista aiheutuneisiin nostaviin voimiin. Puun hyvästä työstettävyydestä johtuen puuelementtien mittatoleranssit ovat kaikilla rakentamistekniikoilla vain muutamia millemä, joten puukerrostalon perustusten mittatoleranssien on oltava myös samaa luokkaa.

Puukerrostalon kokonaisjäykistyksestä aiheutuvien nostavien voimien takia puukerrostalojen perustusten on oltava painavia. Painavat perustusrakenteet ovat kustannuksiltaan ja dimensioiltaan suuria sekä kalliita. Suuret perustusrakenteet ovat varsinkin luvussa 6 mainittujen pilari-palkkirunkoisten puukerrostalojen ominaisuus.

5.1.2 Muut betonirakenteet

Suomen paloturvallisuusmääräyksissä esitettyjen taulukkoarvojen mukaan puukerrostalon puurakenteisen uloskäytävän rakenteet portaiden yläpintaa lukuun ottamatta pitää suojata syttymiseltä vähintään 30 minuuttia paloa pidättävillä tarvikkeilla. Hissi ei ole uloskäytävä, mutta se on lähes aina vähintäänkin osastoiva rakenne, joten sillä on luvun 3 taulukossa 3.4. esitetyt rakenteiden suojaverhousvaatimukset. Puurakenteisia hissi- ja porraskuilurakenteita voidaan jättää näkyviin käytännössä vain käyttämällä toiminnallista paloturvallisuussuunnittelua. [13] Betonikerrostaloissa porraskuilu- ja hissikuiluja käytetään rakennusta jäykistävinä rakenteina, mutta luvussa 6 kerrotuista puukerrostalon jäykistysperiaatteista johtuen puukerrostaloja ei voi jäykistää betonikerrostalojen tapaan.

Paloturvallisuusseikoista johtuen viime vuosina Suomessa rakennettujen puukerrostalojen hissi- ja porraskuilut ovat olleet pääasiassa perinteisiä betonielementtirakenteisia. Yksi poikkeuksista on kuitenkin Suomen ensimmäinen yli neljäkerroksinen puukerrostalo, joka valmistui Vierumäelle vuoden 2011 lopussa. Kuvassa 5.2. on Vierumäen kerrostalon porraskuilu.



Kuva 5.2. Puurakenteinen porraselementti

Vierumäen puukerrostalon porrassyöksyt ovat palonsuojakäsiteltyjä puuelementtejä. Puun näkyminen porrassyöksyissä on oiva tapa tuoda esille puun esteettisyyttä, koska ne ovat lähes aina ensimmäinen asia, jonka henkilö näkee astuessaan puukerrostaloon. Vierumäen porraskäytävien paloturvallisuus on varmistettu toiminnallisella paloturvallisuussuunnittelulla.

Perustusten ja maanvaraisten rakenteiden lisäksi ainut puukerrostalon pakollinen betonirakenne on väestönsuoja. Väestönsuoja mitoitetaan kestäämään isoja onnettomuuskuormia ja säteilyä, jolloin sen rakenteiden pitää olla lujia, räjähdysten kestäviä ja massiivisia.

5.2 Teräsrakenteet

5.2.1 Kantavat teräsrakenteet

Kantavat teräsprofiilipilarit ja -palkit ovat puurakenteiden tapaan kevyitä, mutta lujempia ja kalliimpia kuin vastaavat puurakenteet. Teräs on lisäksi betonin tavoin palamaton materiaali. Lujuuden ja palamattomuuden takia kantavien teräsrakenteiden käyttö saattaa olla perusteltua puurakenteiden ohella. Mahdollisia teräsrakenteita ovat märkätilojen alapuoliset välipohjarakenteet ja parvekkeet.

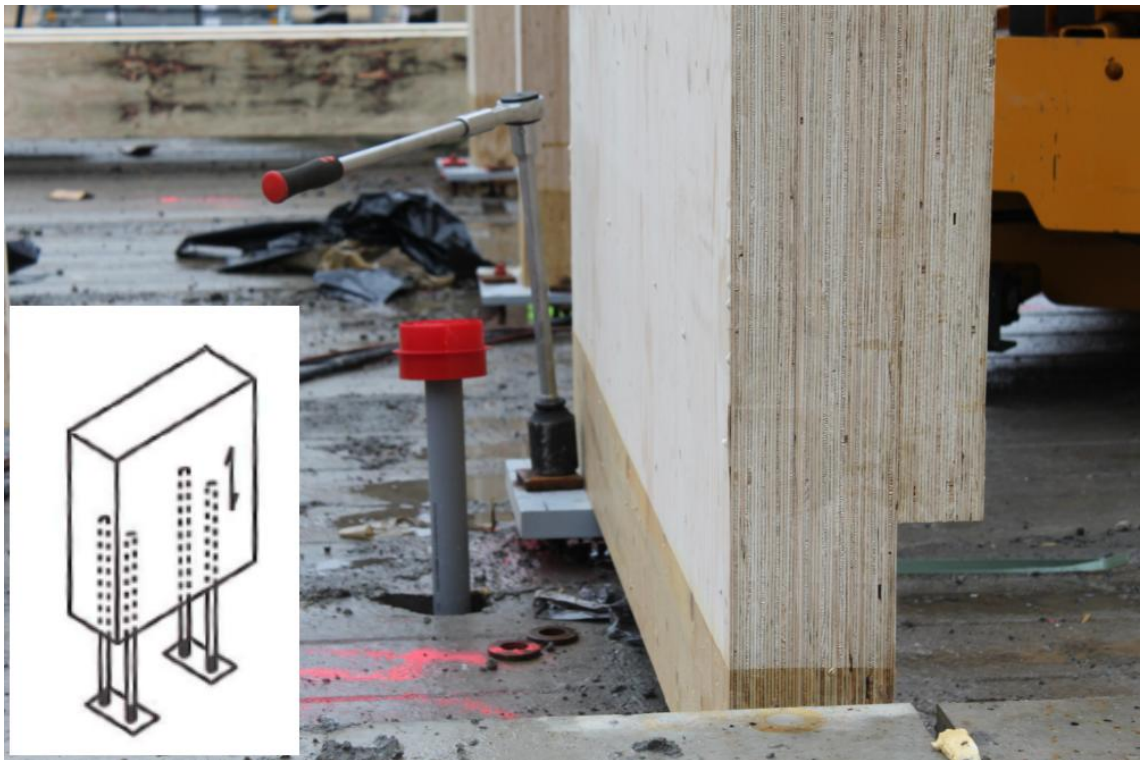
Märkätiloihin tarvitaan usein muita huoneita paksumpi pintavalu lattialämmitysrakenteiden ja tarvittavien kaatojen sekä viemärirakenteiden johdosta. Paksu pintabe-

tonikerros tuo välipohjaan lisämassaa, jota ei ole välttämättä järkevää kannatella puisilla välipohjapalkeilla.

Parvekkeet sen sijaan pystytään kannattamaan mainiosti puupilareilla, mutta nykyisten palomääräysten ansiosta parvekkeiden kantavia puurakenteita pitää suojaverhoilla, jos paloturvallisuutta ei varmisteta toiminnallisella paloturvallisuussuunnittelulla. Siksi teräsrakenteiden käyttö parvekerakenteissa on perusteltua.

5.2.2 Liitokset

Puukerrostalon rakenneosat liitetään toisiinsa mekaanisesti tai liimaamalla. Liimaliitokset ovat luvanvaraisia, joten niitä tehdään vain valvotuissa tehdasoloissa. Liimaliitoksia käytetään yksittäisten rakenneosien liittämiseksi toisiinsa, ja ne ovat aina elementtien sisäisiä liitoksia. Liimaliitoksia ovat esimerkiksi CLT-lamellien väliset liitokset, laattapalkkivälipohjaelementeissä oleva puupalkin liitos sen päällä olevaan vanerilevyyn ja erilaisten teräслиittimien liimaaminen puuelementteihin. Kuvassa 5.3. kerto-puupilari on kiinnitetty betoniperustukseen. Pilariin liimataan elementtitehtaalla pilari-kenkä, joka kiinnitetään mekaanisesti työmaalla perustuksiin.



Kuva 5.3. Pilarikenkäliitos [4, s.70]

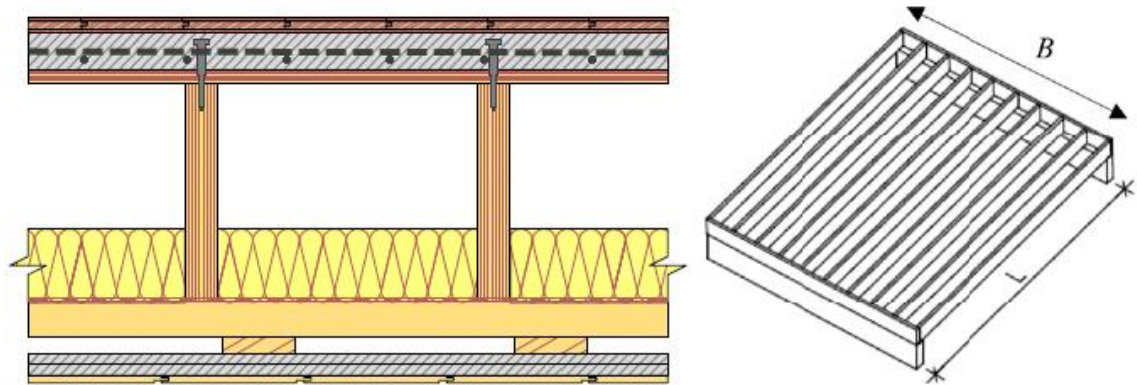
Mekaaniset puuliitokset ovat liitoksia, joissa puurakenteet yhdistetään toisiinsa erillisten mekaanisten liittimien avulla. Puukerrostalon mekaaniset liittimet valmistetaan teräksestä. Mekaaniset liitokset ovat naula-, pultti-, ruuvi-, vaarna- ja naulalevyliitoksia tai mekaanisia muotokiinnikkeitä. Kuvassa 5.3. oleva pilarikenkäliitos on muotokiinnikeliitos. Työmaalla tehtävät liitokset ovat mekaanisia elementtien välisiä liitoksia, joista suurin osa on ruuviliitoksia.

5.3 Komposiittirakenteet

Komposiittirakenne on yhdistelmä rakenne, jossa kaksi tai useampi eri materiaali toimii yhdessä kantavana ja jäykistävänä rakenteena. Eri materiaalit eivät ole sulautuneina toisiinsa, vaan niiden yhteistoiminta saadaan aikaan erilaisten liitinten avulla. Komposiittirakenteita kutsutaan siten myös liittorakenteiksi. Liittorakenteiden tarkoituksena on hyödyntää eri materiaalien parhaat puolet siten, että lopullinen yhdistelmä rakenne on tehokkaampi kuin yksittäisestä materiaalista tehty rakenne.

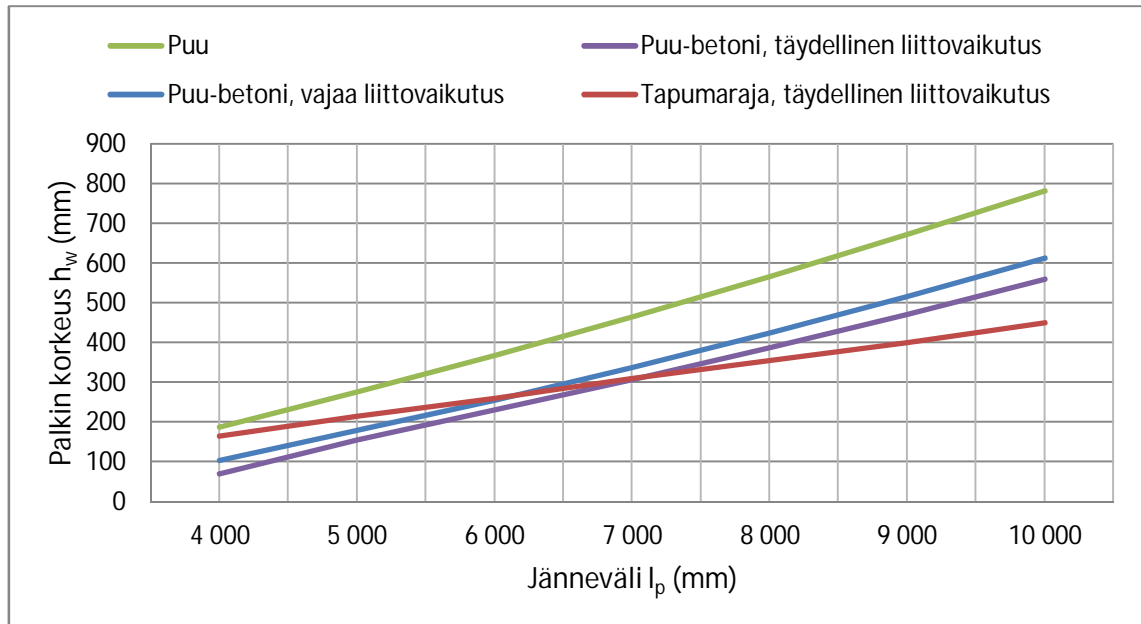
Yksi yleisimmistä Suomessa käytetyistä liittorakenteista on teräksen ja betonin muodostama liittopalkki, joka muodostuu teräspalkista ja betonivalusta. Puu on varsinakin lyhyemmällä jänneväleillä varteenotettava vaihtoehto teräksen käytölle liittopalkkirakenteissa. Puu on teräsprofiileja huomattavasti edullisempaa ja se kestää hyvin veto- rasituksia.

Yleisin puuta sisältävä liittorakenne on puu-betoniliittopalkki, jossa puupalkin päälle valetaan betonilaatta, joka kiinnitetään puupalkkeihin mekaanisilla liitoksilla. Puu-betonipalkki on lähes ainut puukerrostalojen rakenteissa käytetty komposiittirakenne. Kuvassa 5.4. on Suomessa puukerrostalossa käytetty liittopalkki, joka muodostuu puusta laattapalkkielementistä ja sen päälle valetusta keskeisesti raudoitetusta pintavalusta. Työmaalla tehtävä betoninen pintavalu kiinnittyy puupalkkiin kansiruuveilla. Kuvan välipohjarakenteessa ei liittorakenteen aikaansaamisen takia ole askeläänieristävyyden kannalta tärkeää pintavalun alapuolista eristyskerrosta. Siksi pintavalun päälle on yleensä tehtävä pintavalusta erillisellä ääneneristyskerroksella irrotettu lattia.



Kuva 5.4. Puu-betonivälipohja [24, 27]

Puu-betonivälipohjan korkeuden mitoittaa pitkällä jänneväleillä luvussa 3.3.2 mainittu kävelyherätteestä johtuva värähtely. Lyhyillä jänneväleillä mitoittavaksi tekijäksi nousee taipuma. Värähtelymitoituksesta saadun puu-betonivälipohjan paksuus on vastaavilla jänneväleillä suuremman jäykkyytensä johdosta pelkkää puurakennetta selvästi pienempi. Kuvassa 5.4. on vertailtu luvun 3.3.2 kuvassa 3.11. esitettyä pintavalullisen puuvälipohjapalkin korkeutta kuvan 5.4. liittorakenteisen välipohjapalkin korkeuteen. Molemmissa välipohjarakenteissa pintavalun paksuus on 60 millimetriä. Laskut ovat liitteessä 2.



Kuva 5.5. Puu-betonivälipohjapalkin minimikorkeus jännevälin funktiona

Puun ja betonin liitto ei välipohjarakenteissa ole käytännössä koskaan täydellinen, koska liitososat eivät todellisuudessa ole täysin jäykkiä ja märän pintavalun kuivuminen aiheuttaa siirtymiä rakenneosien välille. [42] Siksi kuvassa 5.4. on liittorakennepalkin paksuus täydellisellä liittovaikutuksella ja vajaalla liittovaikutuksella. Vajaa liittovaikutus on laskettu siten, että betonin poikkileikkauksesta on huomioitu vain puolet.

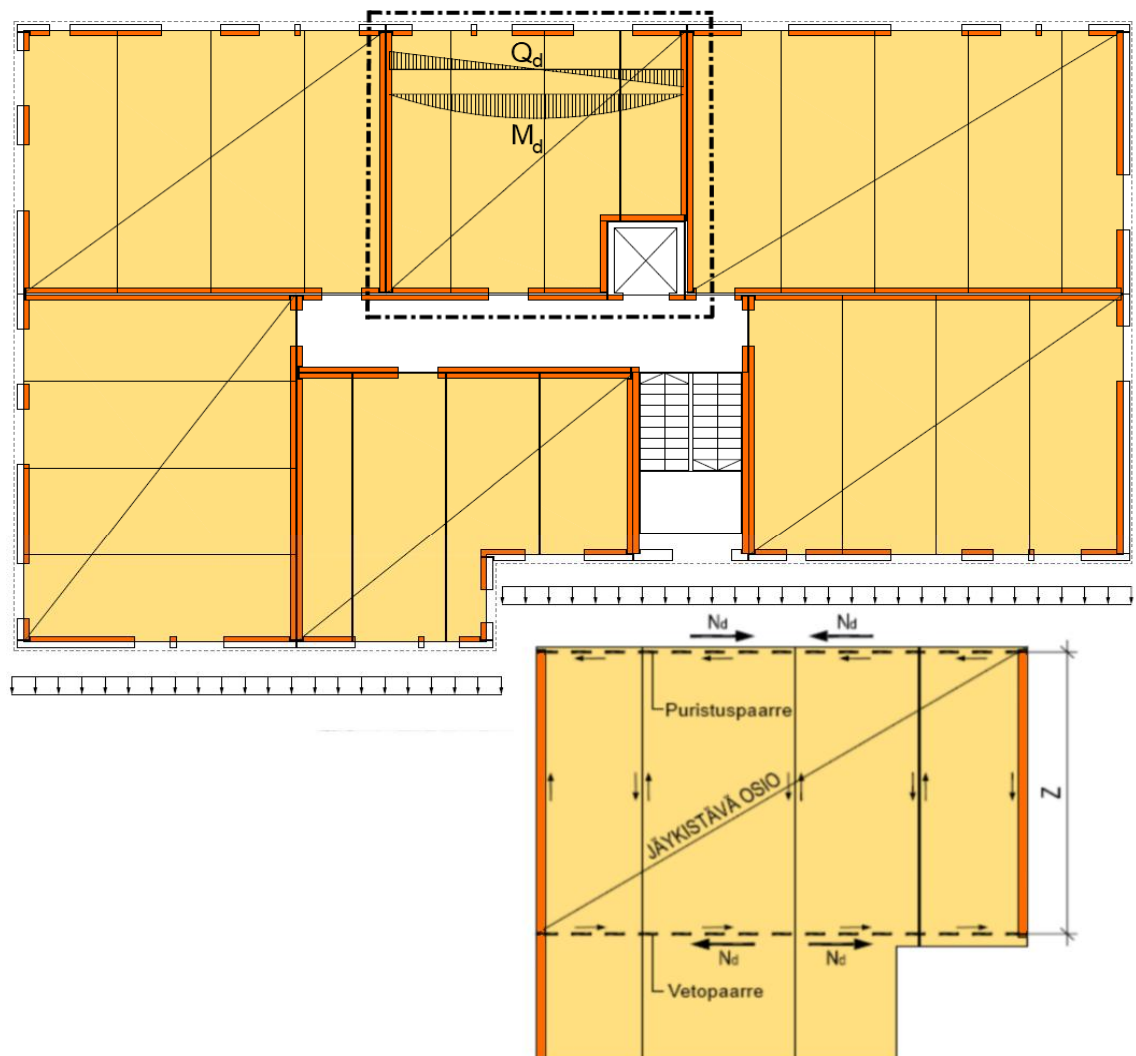
Lyhyillä jänneväleillä liittovaikutuksen tuomaa hyötyä ei pystytä kokonaan käyttämään, koska pintalaatan massan johdosta rakenne taipuu liikaa. Taipumaraja määrää palkin korkeuden lyhyillä, alle kuuden metrin jänneväleillä. Yli kuuden metrin jänneväleillä taipuma ei enää ole ratkaiseva tekijä ja komposiittirakenne on selvästi pelkkää puurakennetta matalampi.

6 PUUKERROSTALON RAKENTAMINEN

6.1 Puukerrostalon rakennejärjestelmät

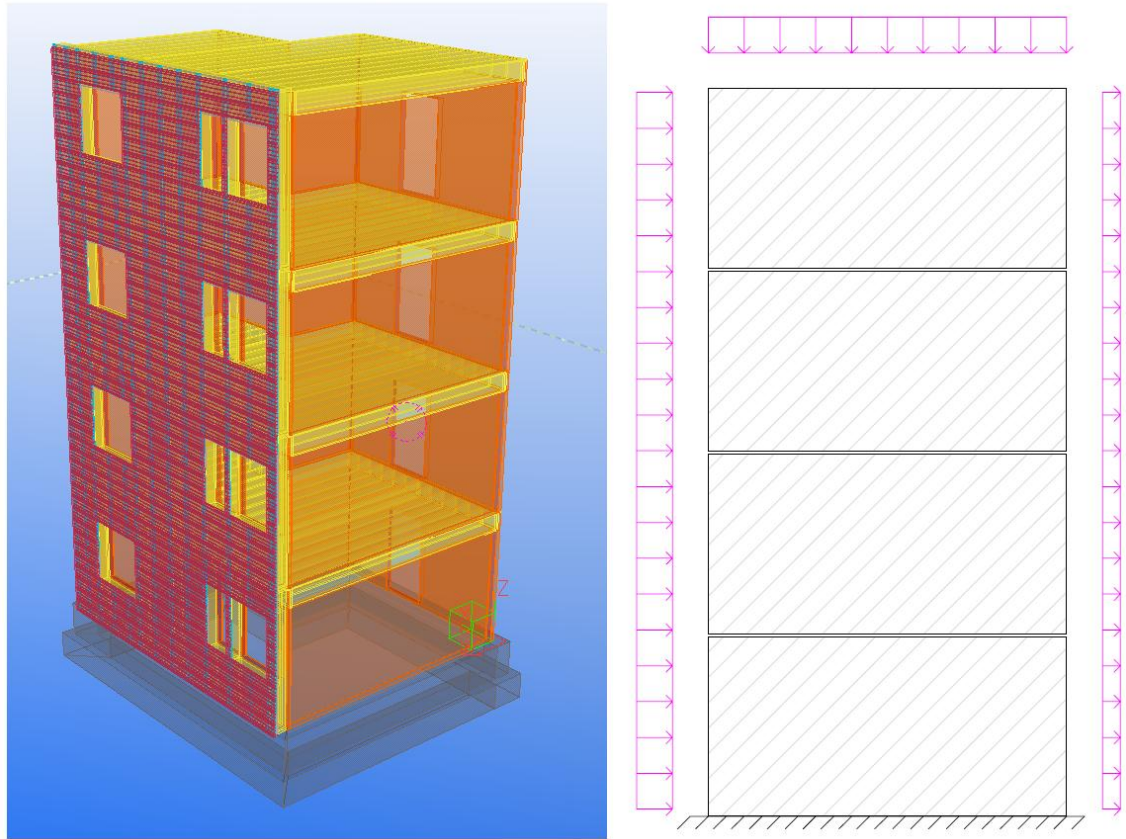
6.1.1 Kantavat seinät

Kantavat seinät -järjestelmä on rakennejärjestelmä, jossa ei ole erikseen kantavaa, seinistä erotettua runkoa. Järjestelmässä rakennuksen seinien rungot toimivat kantavina ja jäykistävinä rakenteina. [5, s. 35] Puukerrostalon välipohjia ei voida askelääneneristävyyden vuoksi rakentaa yhtenäisiksi koko kerroksen kokoisiksi jäykiksi tasoiksi, jotka välittävät vaakavoimat jäykistävälle seinälinjoille. Siksi puukerrostalon välipohjat rakennetaan jäykiksi rakennusosakohtaisesti, jolloin seinät ja niiden väliset välipohjat muodostavat kuvan 6.1. mukaisia rakennusosakohtaisia jäykistäviä kenttiä.



Kuva 6.1. Asuinpuukerrostalon huoneistokohtaiset jäykistävät kentät [35, s. 31]

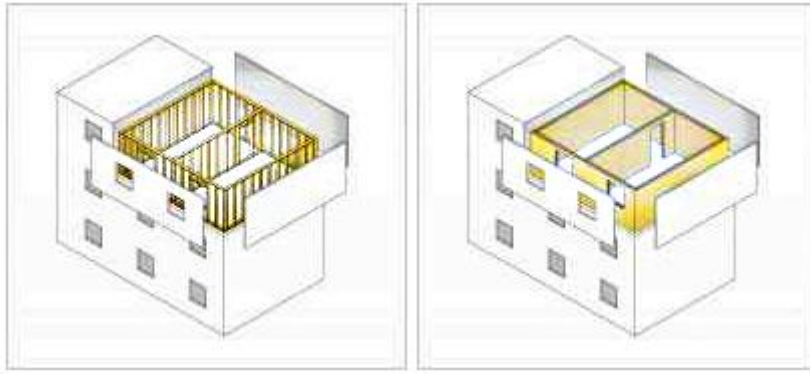
Jäykistävät kentät ovat vaakasuuntaisia, kuvan 6.1. alaosan mukaisia palkkimaisia rakenteita, joille tulevat voimat siirtyvät välipohjasta seinille. Pällekkäiset kerroksen korkuiset jäykistävät rakennusosat muodostavat rakennuksen sisään itsenäisiä jäykistetreneja. Jäykistetornit siirtävät kerrostaloon kohdistuvat vaaka- ja pystyvoimat jäykkien levymäisten seinien kautta perustuksille. Kuvassa 6.2. on edellisen kuvan päällekkäisistä jäykisteosioista muodostuva jäykistetorni.



Kuva 6.2. Jäykistetorni

Vierekkäiset itsenäiset jäykistetornit kiinnitetään pistemäisesti toisiinsa, jotta rakennukseen kohdistuvat vaakakuormat jakautuvat tasaisesti eri jäykistetorneille. [35, s. 31] Kuvan 6.2. staattisesta mallista huomataan, että torneille tulevien vaakakuormien ansiosta perustuksiin muodostuu momentti, joka pyrkii kaatamaan rakennusta nostaen perustuksia maasta. Puurakenteiden keveydestä johtuen kaatumista vastustavat pystykuormat ovat suhteellisen pienet, jolloin seinien välisiin liitoksiin, perustusliitoksiin ja perustusten kokoon on rakenteita suunniteltaessa kiinnitettävä erityistä huomiota.

Kantavat seinät -järjestelmän seinien sisäinen rakenne voi olla joko ranka- tai massiivipuurakenteinen. Kuvassa 6.3. on ranka- ja massiivipuurakenteinen kantavat seinät -rakenteinen puukerrostalo.

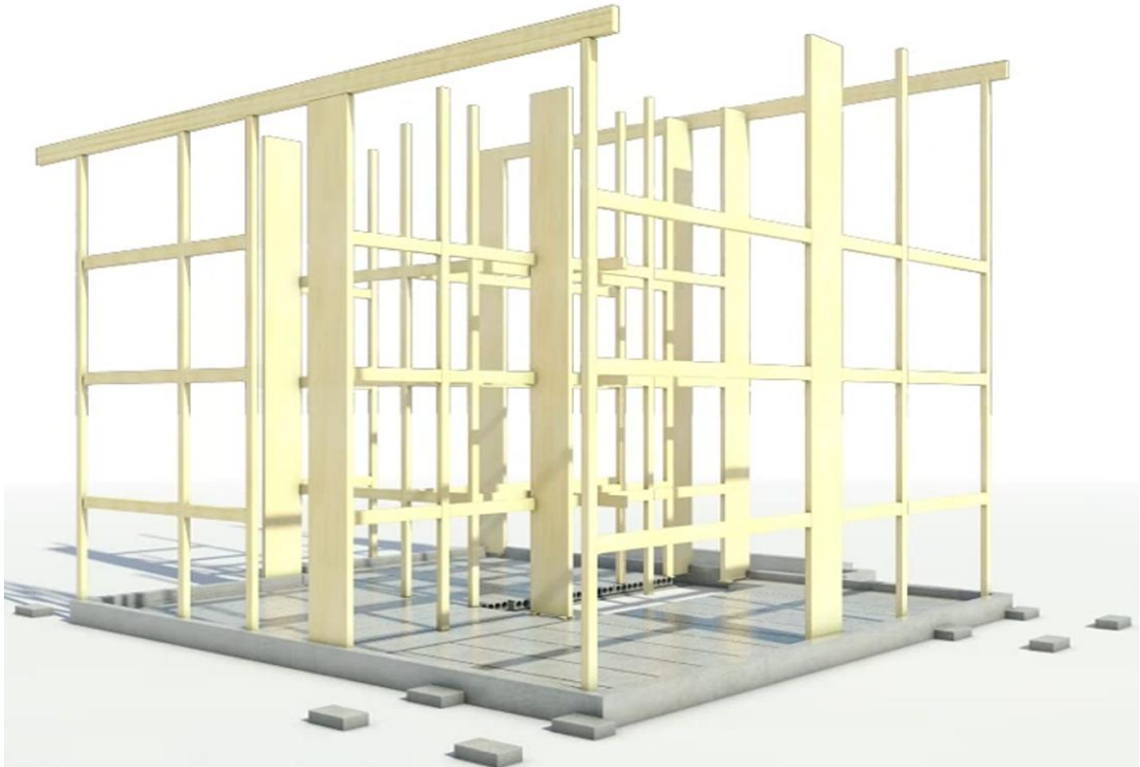


Kuva 6.3. Ranka- ja massiivipuurakenteinen kantavat seinät -kerrostalo [43]

Ranka- ja massiivipuurakenteisilla seinillä jäykistysperiaatteet ovat samanlaisia. Ainoa ero on seinien sisäisen jäykkyyden muodostuminen. Massiivipuuseinät ovat valmiiksi hyvin jäykkiä. Rankarakenteisten seinien jäykkyys saadaan aikaiseksi rankoihin erikseen kiinnitettävillä levyillä.

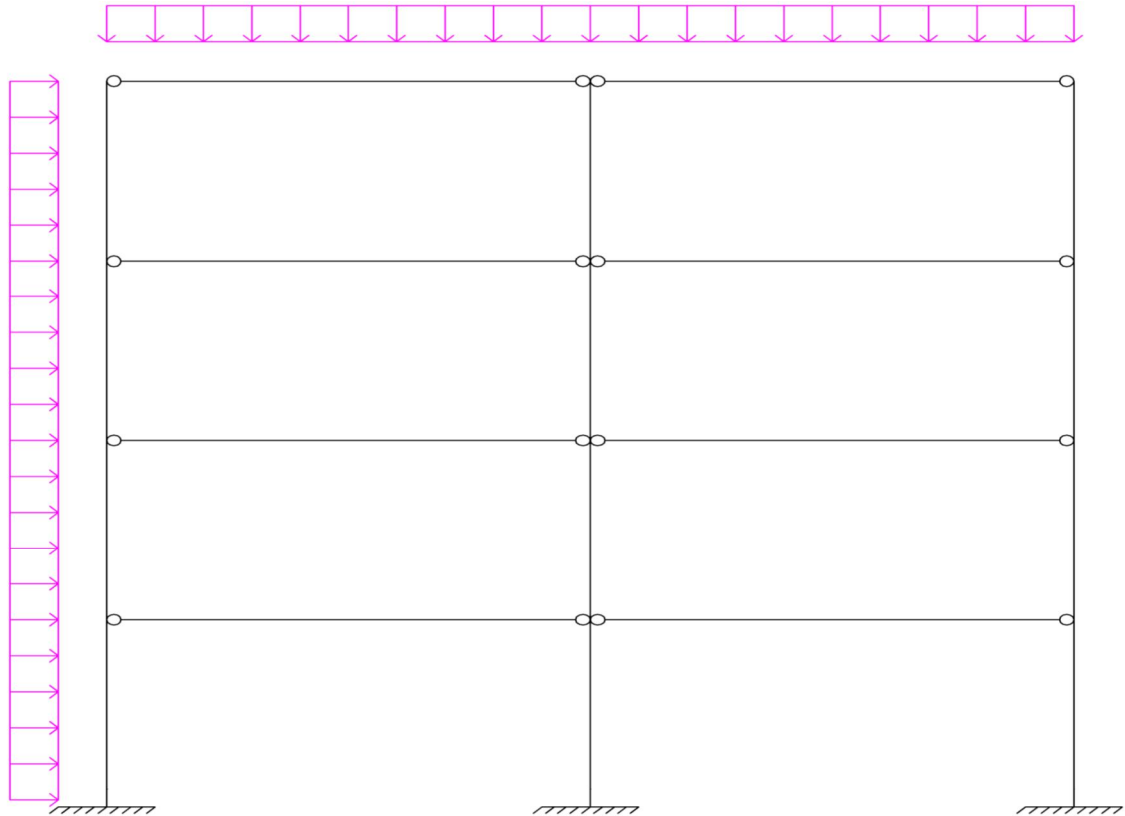
6.1.2 Pilari-palkki

Toinen puukerrostaloissa käytetty rakennejärjestelmä on pilari-palkkijärjestelmä. Järjestelmässä kantavat rakenteet on erotettu omaksi kokonaisuudekseen tilaa rajaavista seinistä. [5, s. 67] Pilari-palkkijärjestelmän kantava ja jäykistävä runko muodostuu kuvassa 6.4. esitetyistä pitkistä, monen kerroksen korkuisista pilareista ja niiden väliin asennettavista palkeista, joiden varaan asennetaan väli- ja yläpohjarakenteet. Osa pilareista on kuvassa olevia leveitä seinämäisiä jäykistepilareita, joiden jäykistävä vaikutus on moninkertainen pienempiin pilareihin verrattuna.



Kuva 6.4. Pilari-palkkirunko[37]

Pilari-palkkijärjestelmässä katto- ja välipohjakuormat siirtyvät väli- ja yläpohjaelementeiltä palkkien kautta pilareille, jotka siirtävät ne perustuksille. Pilari-palkkirakenteinen puukerrostalo jäykistetään vaakavoimia vastaan mastopilariperiaatteella. Mastopilarit toimivat kuvan 6.5. mukaisina alapäistään perustuksiin kiinnitettyinä ulokkeina. [44, s. 14]



Kuva 6.5. Mastopilarijäykistys

Kantavat seinät -järjestelmän tapaan välipohjat rakennetaan rakennusosakohtaisesti jäykiksi kentiksi, jotka siirtävät vaakakuormat pilareille. Pilareiden ja palkkien väliset liitokset ovat nivelellisiä, jolloin ne siirtävät vain vaaka- ja pystykuormia. Pilareiden jäykästä perustuskiinnityksestä johtuen myös pilari-palkkijärjestelmän perustuksiin aiheutuu kaatavia momenteja, joten perustusten ja perustusliitosten suunnitteluun on kiinnitettävä erityistä huomiota. Varsinkin suurten jäykistepilareiden perustusten on oltava massiivisia, koska ne vastaanottavat suurimman osan vaakavoimista.

6.2 Suurelementtitekniikka

6.2.1 Perusteet

Suurelementtitekniikka on koko Suomen asuinkerrostalorakentamisessa yleisimmin käytetty rakentamistekniikka, koska suurin osa betonirakenteisista asuinkerrostaloista on rakennettu suurelementtitekniikalla. Suurelementtitekniikka tarkoittaa kerrostalon rakentamista suurelementeillä. Suurelementtirakenteisen puukerrostalon kaikki puura-

kenteet eli seinät, ylä- ja välipohjat ovat suurelementtejä. Rakennejärjestelmä on kantavat seinät -järjestelmä.

Suurelementtirakenteisen kerrostalon rakentaminen vastaa suurelta osin perinteisen betonielementtitalon rakentamista. Perustukset ja maanvaraiset rakenteet ovat betonisia. Anturat ja sokkelit ovat tavallisesti kuvan 6.6. mukaisia jatkuvia seinälinjojen alapuolelle rakennettavia rakenteita. Kuvassa ovat puukerrostalon maanvaraiset, jatkuvat, paikalla valetut anturat, joiden päälle on asennettu sokkelielementit.



Kuva 6.6. Suurelementtirakenteisen puukerrostalon perustukset [45]

Suurelementtirakenteisen puukerrostalon pystyrakenteet ovat kerroksen korkuisia suurelementtiseiniä. Välipohjat ovat suurvälipohjaelementeistä seinien varaan rakennettuja vaakarakenteita. Elementit asennetaan paikoilleen aina kerros kerrallaan siten, että ensin asennetaan seinäelementit, jonka jälkeen niiden varaan lasketaan välipohjat. Välipohjan asentamisen jälkeen asennetaan seuraavan kerroksen seinät ja niin edelleen. Ylimpien seinäelementtien päälle asennetaan yläpohjaelementit. Kuvassa 6.7. on puukerrostalon eri suurelementtejä asennettuina.



Kuva 6.7. Seinä-, välipohja ja yläpohjaelementtien asennus [45]

Kuvan vasemmassa ylälaidassa on ensimmäisen kerroksen seinäelementit asennettuina perustusten päälle. Oikealla kiinnitetään välipohjaelementtiä seinien päälle. Alimmassa kuvassa pitkä lappeen mittainen yläpohjaelementti on nostettu kantavien seinien varaan. Suurelementit voivat olla valmiusasteeltaan lähes valmiita välipohjien pintavalua lukuun ottamatta. Silloin työmaalla tehdään elementtien liittämisen lisäksi vain tarvittavat viimeistelytyöt.

6.2.2 Rakenteet

Suurelementtirakenteella kootun puukerrostalon elementit voivat olla kantavilta rakenteiltaan joko ranka- tai massiivirakenteisia. Rakenteiden peruseriaatteen ovat kantavan rakenteen tyypistä riippumatta samoja, koska ne määräytyvät Puukerrostalon erityiskysymyksiä -luvussa mainittujen paloturvallisuus-, ääneneristävyys-, värähtely- ja kosteusteknisten asioiden mukaan. Suurelementtitekniikalla rakennetun alle viisi kerroksisen massiivi- ja rankarakenteisen puukerrostalon tyypilliset rakennetyypit on esitetty liitteessä 3.

6.2.3 Rajoitukset, edut ja haitat

Suurelementtirakenteisella puukerrostalolla ei ole rakentamistekniikasta johtuvia erityisiä rakennussuunnittelua koskevia rajoituksia. Tilasuunnittelua koskevat rakenteelliset rajoitukset, kuten välipohjien maksimijännevälit ja rakenteiden paksuudet, määräytyvät luvussa 3 mainittujen erityiskysymysten mukaan.

Tilasuunnittelun kannalta suurelementtitekniikka on rakentamistekniikoista joustavin. Rakennuksen eri tilojen, kuten asuntojen, muodot voivat olla kohtalaisen monimuo-

toisia, koska yksittäiset elementit pystytään kerroksellisen rakentamisen vuoksi asentamaan kulmikkaidenkin seinälinjojen mukaan. Suorakulmaiset pohjat toki vähentävät elementtien määrää ja siten myös kustannuksia. Kantavien rakenteiden sijoittuminen seinien sisään on myös tekniikan etu.

Suurelementtirakentamisen kolmantena etuna on vielä tällä hetkellä kokemus. Suurelementtirakenteisia puukerrostaloja on rakennettu Suomessa enemmän kuin muilla tekniikoilla, ja tehtyjen mittausten perusteella niiden rakenteelliset ratkaisut ovat toimivia. Lisäksi puusuurelementtirakenteisen kerrostalon rakentaminen osataan pääperiaatteiltaan hyvin, koska se vastaa melko pitkälti betonisuurelementtirakentamista, josta on monen vuosikymmenen kokemus.

Monista puu- ja betonisuurelementtirakentamisen yhtäläisyyksistä huolimatta suomalaista puusuurelementtikerrostaloa ei voi rakentaa kuten vastaavaa betonikerrostaloa. Suurin syy tähän ovat Suomen sääolosuhteet. Suurelementtitekniikalla toteutetun kerrostalon sääoloille altis työmaa-aika on hyvin pitkä. Rakennuksen elementit asennetaan kerros kerrallaan, ja ulkovaippa on vedenpitävä aikaisintaan, kun viimeiset vesikattoelementit on asennettu.

Puu ei kestä betonin tavoin kosteutta, joten kaikki puuelementit on suojattava rakentamisen aikaiselta kosteudelta. Suojaaminen voidaan toteuttaa elementtikohtaisesti, jolloin seinäelementit suojataan kuvan 6.8. yläosan mukaisesti ja välipohjien päälle nostetaan aina työpäivän päätteeksi kuvan alalaidassa oleva väliaikainen vesikatto. Elementtikohtainen suojaus ja väliaikainen vesikatto ovat halpa vaihtoehto, mutta huonojen sääolosuhteiden vallitessa elementtejä ei voida asentaa ollenkaan.



Kuva 6.8. Suurelementin ja välipohjan suojaus

Toinen, kalliimpi sääsuojausvaihtoehto on täyshuputus. Perustusten rakentamisen yhteydessä rakennetaan ylimääräiset perustukset, joille perustetaan sääsuoja. Kuvassa 6.9. on kaksi vaihtoehtoista tapaa puukerrostalon täyshuputukselle. Kuvassa vasemmalla oleva puukerrostalo on rakennettu Ruotsiin, ja oikeanpuoleinen sääsuoja on Suomen Vierumäelle rakennetusta viisikerroksisesta puukerrostalosta.



Kuva 6.9. Puukerrostalon sääsuojaus [45, 46]

Kuvan vasemmanpuoleisen talon sääsuoja oli kerrosten mukaan nouseva huppu, joka kiinnitettiin teräspilareiden varaan. Pilareiden varaan hupun alle rakennettiin lisäksi kiskoilla kulkeva nosturi, jolla nostettiin suurelementit paikoilleen. Oikealla olevassa suomalaisessa versiossa korkea erillinen sääsuoja rakennettiin koko kerrostalon korkuisena ja elementtien nostot tapahtuivat sen ulkopuolelta, jolloin sääsuojan katto jouduttiin aina avaamaan nostoja suoritettaessa.

6.3 Tilaelementtitekniikka

6.3.1 Perusteet

Tilaelementtitekniikka on rakentamistapa, jossa rakennus muodostuu tilaelementeistä. Tilaelementtitekniikalla rakennetun puukerrostalon työmaa-aika on erittäin lyhyt, koska tilaelementti on teollisista moduuleista esivalmistetuin ja kooltaan suurin. Tilaelementtirakenteisen puukerrostalon rakennejärjestelmä on kantavat seinät -järjestelmä.

Tilaelementtirakenteisen talon perustukset rakennetaan kuten suurelementtitekniikalla. Perustukset rakennetaan tavallisesti jatkuviksi kantavien seinälinjojen alle. Ainoana erona suurelementtitekniikkaan on perustuslinjojen määrä. Tilaelementtitekniikalla perustuslinjoja tulee enemmän, koska tekniikan kokorajoitusten takia kantavia seinälinjoja on enemmän kuin suurelementeillä rakennettaessa. Kuvassa 6.10. on esimerkki tilaelementtipuukerrostalon perustuksista ja sen päälle asennettavista tilaelementeistä.

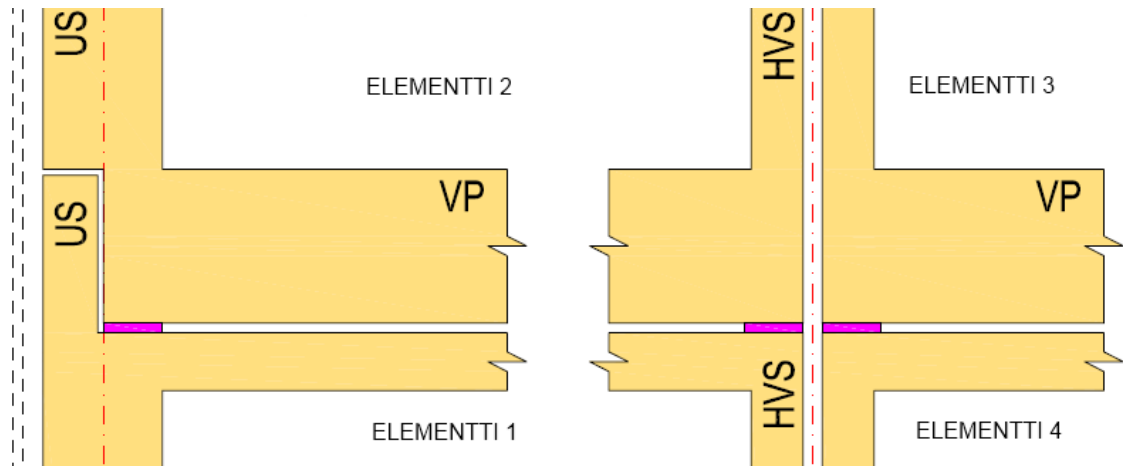


Kuva 6.10. Tilaelementtirakenteisen puukerrostalon rakentaminen [38, 47]

Kuvasta huomataan, että perustussokkelit on valettu tilaelementin muodon vuoksi suorakulmaisiksi, jolloin elementin kaikki seinät tukeutuvat niihin. Perustusten päälle asennetaan kerrosten tilaelementit kerros kerrallaan. Vesikatto kootaan rakenteesta riippumatta myös pääsääntöisesti mahdollisimman isoista tilaelementeistä. Kuvan alareunassa asennetaan kattoristikkotilaelementtiä paikoilleen.

6.3.2 Rakenteet

Tilaelementin kantavat rakenteet voivat olla massiivi- tai rankarakenteisia. Yhdessä tilaelementissä on lattia, seinät ja katto, joten kaikki tilaelementtien väliset rakenteet ovat rakennustekniikasta johtuen kaksoisrakenteisia. Kaksoisrakenneperiaate on näytetty kuvassa 6.11.



Kuva 6.11. Tilaelementtipuukerrostalon rakenteet [35]

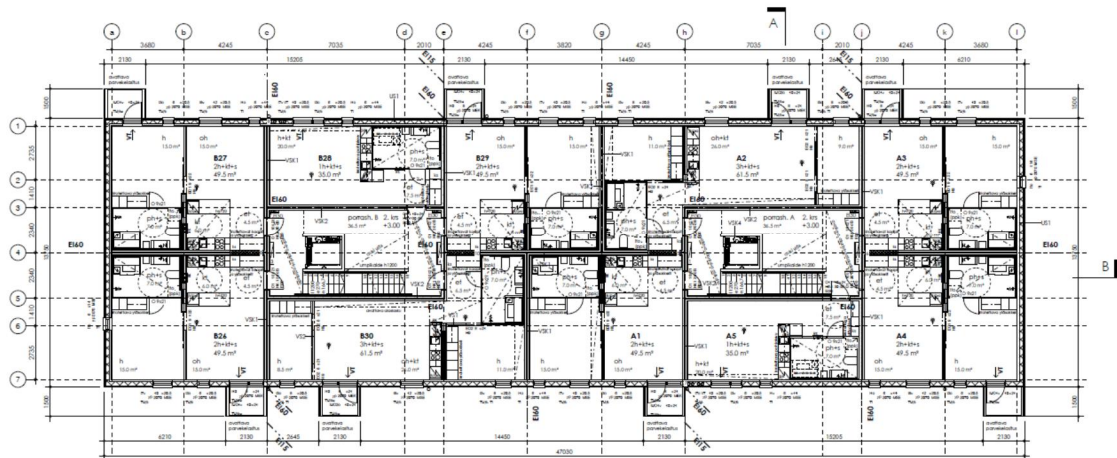
Tilaelementtirakenteisen puukerrostalon rakennetyypit ovat ulkoseinän ja huoneistojen välisen seinän osalta samoja kuin suurelementtipuukerrostalossa, koska ulkoseinä ei ole kaksoisrakenteinen ja huoneistojen välinen seinä on puukerrostaloissa ääneneristysvaatimusten vuoksi aina kaksoisrakenteinen. Alapohjarakenne on tilaelementtitekniikalla kaksoisrakenteinen, mikäli sen kantava osa tehdään betonista. Puurakenteinen tuuletettava alapohjarakenne on sama suur- ja tilaelementtitekniikalla rakennettaessa. Tilaelementtipuukerrostalon rakennetyypit on esitetty liitteessä 3.

6.3.3 Rajoitukset, edut ja haitat

Tilaelementtitekniikka on puukerrostalon rakentamistekniikoista rakennussuunnittelua rajoittavin. Rajoitukset tulevat tilaelementin maksimimitoista, jotka määräytyvät järkevän välipohjapaksuuden, elementin kokonaispainon ja Suomen tieverkossa sallittavien kuljetusmittojen mukaan. Tilaelementin maksimileveys on viisi metriä, jolloin kaksoisrakenteisten välipohjien paksuus ja kerroskorkeus pysyvät järkevinä. 5 metrin levyisen tilaelementin korkeus eli kerroskorkeus on 3,2 metriä. Pienillä välipohjan jänneväleillä voidaan käyttää 3 metrin kerroskorkeutta. 5 metrin leveydellä ja 3,2 metrin korkeudella tilaelementin maksimipituus on noin 15 metriä. Pituus määräytyy pääasiassa rakennustyömaalla olevan nostokaluston nostokapasiteetin mukaan. Tilaelementti voi erikoistapauksissa olla edellä mainittuja mittoja suurempi. Erikoiselementtejä ovat esimerkiksi suuret yläpohjatilaelementit. Niiden koon määrittävät tiekuljetusreitit.

Suomi on Euroopan ainoa valtio, johon on suunniteltu erikoiskuljetusreitistö. Reitistöllä kuljetuksen maksimileveys ja -korkeus ovat noin 7 metriä. Laki sallii suuremmatkin kuljetukset, mutta varsinkin korkeuden ylittäessä 7 metriä, alkavat tien yläpuoliset opasteet eli portaalit sekä puhelin- ja sähköjohdot aiheuttaa rajoitteita. Pääteillä siltojen korkeudet vaihtelevat 4,5 ja 5 metrin välillä. Lastauskorkeuden huomioiden alle 4,4 metriä korkeita tilaelementtejä pystyy kuljettamaan pääteillä. Kehä kolmosen sisäpuolella ja suurten kaupunkien keskustoissa leveyden olisi hyvä olla alle 5 metriä ahtaiden liikennevalosuojateiden takia. Tilaelementtien maksimipituus on erikoiskuljetusreitistöllä noin 20 metriä ja kaupunkien keskustoissa noin 15 metriä.

Kuvassa 6.12. on tilaelementtirakenteisen asuinpuukerrostalon pohjapiirustus. Piirustuksesta huomataan hyvin edellä mainittujen kokorajoitusten tuomat rakennesuunnittelun reunaehdot. Ne johtavat suorakulmion muotoisiin, tilaelementin kokoisiin huoneisiin ja asuntoihin. Kuvan rakennus on suunniteltu Seinäjoen keskusta.



Kuva 6.12. Tilaelementtirakenteisen asuinpuukerrostalon pohjapiirustus [48]

Tilaelementtirakentaminen sopii rajoitteidensa vuoksi asuinrakentamiseen. Työpaikkarakentamisessa vaaditaan nykyään avoimia ja muuntojoustavia tiloja, ja niitä pystytään tilaelementtitekniikalla huonosti toteuttamaan.

Muut tilaelementtitekniikan tuomat suunnittelurajoitukset liittyvät suunnittelu-aika- ja muutoshetkisiin. Suuri esivalmistusaste aiheuttaa sen, että kaikkien suunnitelmien on oltava valmiina, kun tilaelementtejä aletaan tehdä. Suunnittelumuutokset ja mahdolliset loppukäyttäjän eli asukkaan tekemät muutokset eivät ole mahdollisia enää tilaelementtien valmistuttua, vaikka itse työmaalla ei ole rakennettu lainkaan.

Yksi tilaelementtitekniikan tuoma haitta aiheutuu edellä mainitusta kaksoisrakenteellisuudesta. Huoneistojen väliset seinät ovat kaikilla rakentamistekniikoilla kaksoisrakenteisia, mutta tilaelementtitekniikalla huoneistojen sisäisetkin tilaelementtien väliset seinät ovat kaksoisrakenteisia. Edellä mainittu seikka syö suurten, monesta tilaelementistä koostuvien asuntojen myytävää huoneistoalaa.

Tilaelementtitekniikan tuomat suurimmat hyödyt ovat pääoman tehokkaan hyödyntämisen mahdollistava rakentamisnopeus ja teollisen esivalmistuksen aikaansaama laatu. Tilaelementtitekniikalla rakennettaessa suurin työ tehdään elementtitehtaalla ja työmaalla ainoastaan kootaan elementit kerrostaloksi. Siksi tilaelementtitekniikalla työmaalla on vain murto-osa muiden tekniikoiden työmaa-ajoista. Tilaelementtikerrostalo nousee harjakorkeuteen kerrosten lukumäärästä ja kerrosalasta riippuen noin viikossa. Pystytysnopeus on suunnilleen yksi elementti tunnissa. Yhden kerroksen tilaelementit asennetaan noin yhdessä työpäivässä. Kuvan 6.10. yläosassa nostetaan viidennen kerroksen tilaelementtiä paikoilleen. Rakennuksen kokoamisen jälkeen sisä- ja ulkopuolisten elementtisaumojen viimeistelyssä, talotekniikan kytkeämisessä ja muissa liittyvissä töissä, kuten erillisten parvekkeiden asennuksessa, menee noin 1–2 kuukautta.

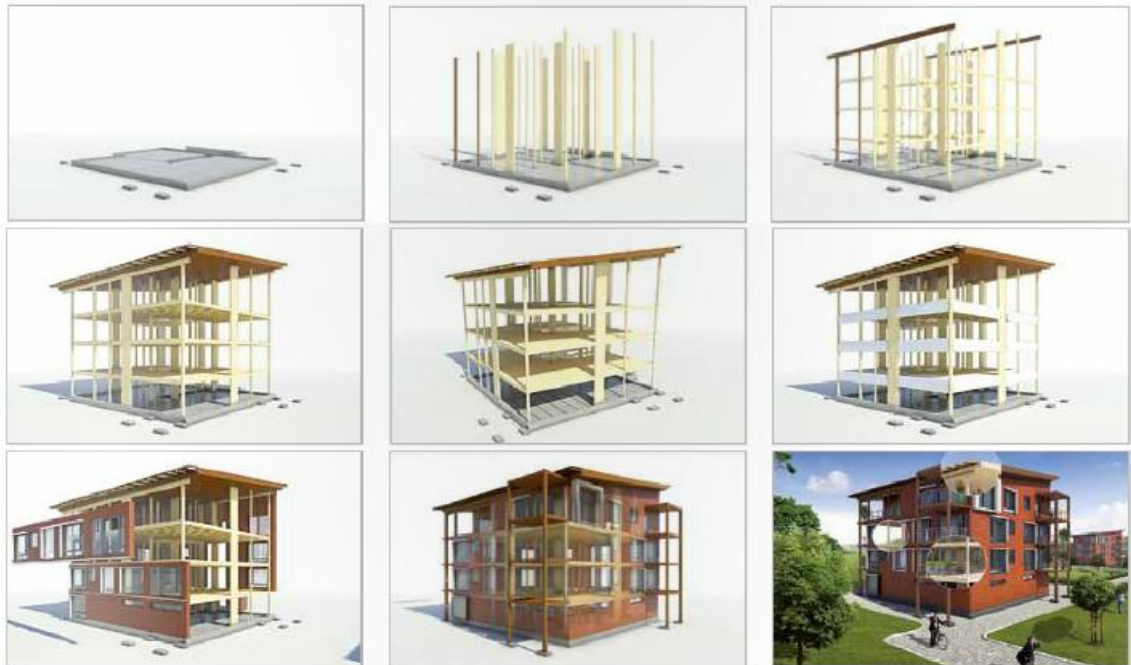
6.4 Pilari-palkkitekniikka

6.4.1 Perusteet

Pilari-palkkitekniikalla rakennetun kerrostalon rakennejärjestelmä on nimensä mukaisesti pilari-palkkijärjestelmä. Betonirakenteisia pilari-palkkikerrostaloja on rakennettu Suomessa monen vuosikymmenen ajan. Betonielementtirakenteista pilari-palkkirunkoa pystytetään kuten suurelementtirakenteista kerrostaloa. Ensin asennetaan korkeat, monen kerroksen korkuiset pilarit, joiden jälkeen palkit sekä seinä- ja välipohjaelementit asennetaan kerros kerrallaan.

Pilari-palkkirakenteisen puukerrostalon rakentaminen eroaa vastaavan betonikerrostalon rakentamisesta pääasiassa vain runkoelementtien asennusjärjestykseltään. Anturat ovat pääosin pilarianturoita, ja niiden väliin valetaan sokkelipalkit tai asennetaan sokkelielementit. Ontelolaattarakenteinen alapohja rakennetaan perustusten jälkeen. Valettava alapohja tehdään vasta pilari-palkkirungon ollessa pystyssä.

Perustusten ja ontelolaattojen jälkeen asennetaan pitkät, jopa viiden kerroksen korkuiset pilarit ja niiden väliin kaikkien kerrosten palkit sekä porraskuilu- ja hissikui-luelementit. Pilari-palkkirungon jälkeen asennetaan yläpohjaelementit, joissa on vesikate valmiina. Rungon ja vesikaton asennus kestää talon koosta riippuen noin 1–2 viikkoa. Vesikatto suojaa tehokkaasti sen alapuolella olevia kosteudelle alttiita puurakenteita. Nopean vesikaton asennuksen johdosta erillistä sääsuojaa ei välttämättä tarvita. Pilari-palkkirunkoisen puukerrostalon rakentamisvaiheet on esitetty kuvassa 6.13.



Kuva 6.13. Pilari-palkkipuukerrostalon rakentamisvaiheet [49]

Kuvasarjan neljännessä kuvassa runko ja vesikatto on asennettu. Vesikaton asennuksen jälkeen asennetaan välipohja-, porras- ja julkisivuelementit. Välipohja- ja porrasedelementit pystytään puun keveyden ansiosta asentamaan rakennuksen ulkopuolelta kuvassa 6.14. olevalla kurottajalla.



Kuva 6.14. Välipohjaelementin asentaminen kurottajalla [50]

Välipohjat ja julkisivut voidaan asentaa joko rakennusosakohtaisesti tai siten, että ensin asennetaan kaikki välipohjat ja sen jälkeen julkisivut. Rakennusosakohtaisesti asennus tarkoittaa saman rakennusosan välipohja- ja julkisivuelementtien asentamista samanaikaisesti. Kuvassa 6.14. on esimerkki rakennusosakohtaisesta asennuksesta. Yhden julkisivun elementit ja niiden taakse jäävät välipohjaelementit asennetaan vuorotellen vesikattoon asti.

Rakennusosakohtaisen asennuksen etuna on se, että silloin rakennusta ei tarvitse erikseen sääsuojata, koska sateelle alttiit välipohjarakenteet ovat heti suojassa julkisivuelementtien takana. Pilareita ja palkkeja ei tarvitse lainkaan suojata, koska ne käsitellään tehtaalla itsestään pois kuluvalle sääsuoja-aineella. Mahdollinen sääsuojaus tulee kyseeseen silloin, kun kaikki välipohjaelementit asennetaan ennen julkisivuja. Kuvassa 6.15. on kerrostalo, jonka välipohjat on asennettu ja sen jälkeen ne on suojattu kosteudelta.



Kuva 6.15. Välipohjien sääsuojaus

Rakennuksen rungon ja ulkovaipan asennuksen jälkeen kaikki sisätyöt tehdään paikalla kuivissa sisäoloissa. Esimerkiksi väliseinäelementtejä ei käytetä. Sisätöihin kuuluvat väliseinien lisäksi välipohjien pinnat ja muut viimeistelytyöt.

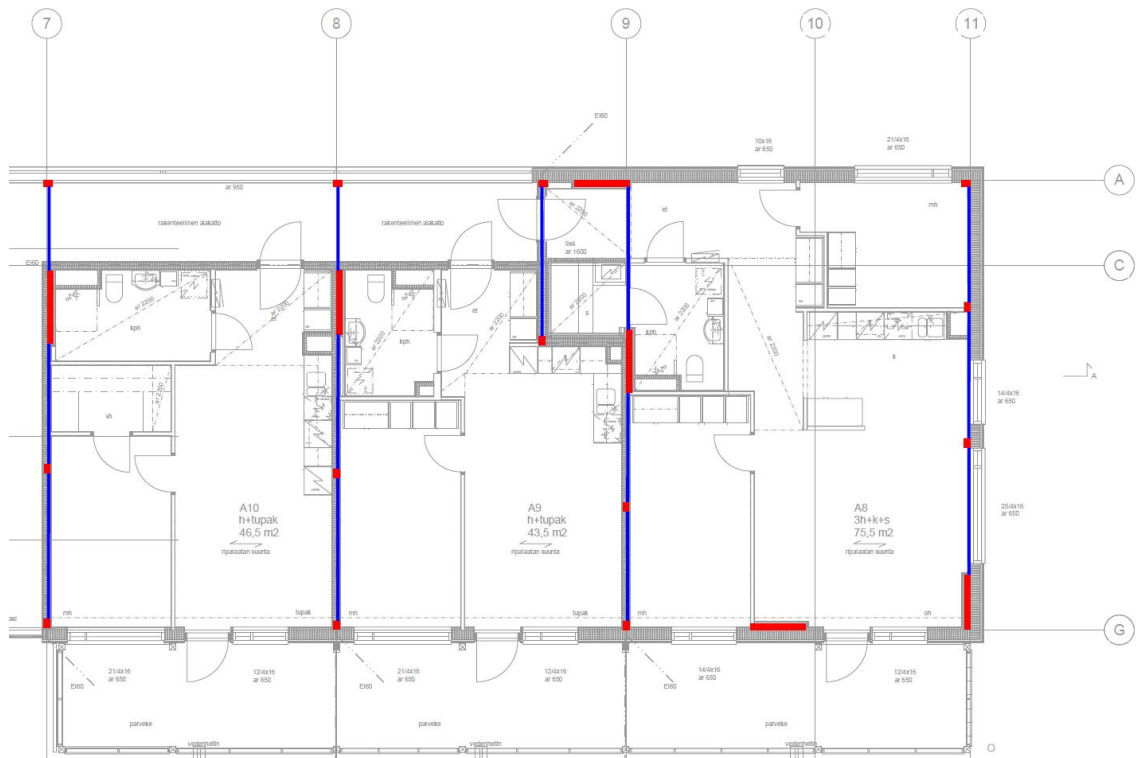
6.4.2 Rakenteet

Pilari-palkkijärjestelmän perustukset koostuvat tavallisesti pilarianturoista, joiden väliin asennetaan sokkelielementit. Alapohjarakenteet voivat olla betoni- tai puurakenteisia tuulettuvia tai maanvaraisia betonilaattoja. Järjestelmässä ei ole kantavia ja jäykistäviä seinärakenteita, joten julkisivuelementit ja väliseinät ovat kevyitä rakennusosia. Väli- ja yläpohjat ovat rankarakenteisia ripa-laattaelementtejä. Rakennetyypit ovat ala-, väli- ja yläpohjien osalta samoja kuin suurelementtijärjestelmässä. Seinärakenteiden osalta ainut ero suurelementtirankarakenteisiin on massiivipuun paksuus tai rankojen määrä ja koko. Pilari-palkki-järjestelmän seinät kantavat vain oman painonsa, joten massiivirakenteet ovat ohuempia tai rankoja on vähemmän ja ne voivat olla paksuudeltaan pienempiä. Rakennetyypit ovat liitteessä 3.

6.4.3 Rajoitukset, edut ja haitat

Pilari-palkkitekniikalla ei ole suurelementtitekniikan tapaan itse rakentamistekniikasta johtuvia rakennussuunnittelurajoituksia. Tilasuunnittelun pitäisi kuitenkin pyrkiä mahdollisimman suorakulmaisiin rakennusosiin, koska kulmikkaat pohjaratkaisut lisää-

vät pilareiden ja palkkien määrää. Pääsääntönä on, että osastoivan seinän kulmassa on aina pilari. Kuvassa 6.16. on esimerkki kustannustehokkaasta pilari-palkkipuukerrostalon osapohjaratkaisusta.



Kuva 6.16. Pilari-palkkirakenteisen puukerrostalon pohjapiirustus [51]

Kuvassa on osa asuinpuukerrostalon pohjapiirustusta. Kantavat pilarit on merkitty punaisella ja kantavat palkit sinisellä. Välipohja on kantava vaakasuunnassa. Isot punaiset pilarit ovat jäykistepilareita. Pohjasta huomataan, että asunnot ovat pääosin suora-kulmioita. Keskimmäisen ja oikeanpuoleisen asunnon välillä oleva seinä ei ole suora, joka johtaa kuvan tapauksessa kahden ylimääräisen pilarin ja niiden välisen palkin asentamiseen.

Pilari-palkkiteknikka on tehokkaimmillaan alle kuusikerroksisissa puukerrostaloissa. Rajana on pilareiden maksimikorkeus, joka on kerroskorkeudesta riippuen 4–5 kerrosta. Lisäksi korkeiden rakennusten jäykistys pelkällä mastopilaritekniikalla on haasteellista.

Yli viisikerroksisten kerrostalojen rakentaminen on mahdollista, mutta silloin rakennus kootaan kahdessa osassa. Ensin asennetaan alempien kerrosten runko, jonka päälle tuleva välipohja toimii väliaikaisena vesikatteena. Ylemmät kerrokset rakennetaan väliaikaisen, vesikatteena toimivan välipohjan päälle vasta, kun alakerrosten välipohjat ja julkisivut on asennettu. Korkeiden pilari-palkkirunkojen jäykistyksessä voidaan käyttää alimmissa kerroksissa pilareiden välissä levymäisiä seinäjäykisteitä. Tällöin puukerrostalon jäykistysperiaate on yhdistetty mastopilari- ja seinäjäykistys.

Järjestelmällä saadaan rakennuksen runko ja ulkovaippa nopeasti kasaan, mutta sisätyöt tehdään paikalla rakentamisena. Sisätöiden tekemisessä kuluu suhteellisen paljon aikaa, koska kaikki materiaali pitää kuljettaa rakennustyömaalle rakennuksen eri ker-

roksiin. Väliseinien rakentamisolosuhteet ovat ulkoilmaan verrattuna hyviä, mutta ne eivät kuitenkaan vastaa valvottuja ja ergonomisia tehdasolosuhteita.

Paikalla rakennettavien sisätöiden tuomien ongelmien lisäksi rakennuksen kokonaisjäykistyksen suunnittelu on ongelmallista. Periaatteellisella tasolla mastopilarijäykistys on helppoa, mutta käytännössä pilareiden väliin asennettavat ulkoseinäelementit asennetaan pilareihin ja toisiinsa niin tiiviisti, että ne jäykistävät myös rakennetta. Jos kyseistä seikkaa ei oteta suunnittelussa huomioon, se saattaa aiheuttaa halkeamia ulkoseinäelementtien levytyksiin.

Pilari-palkkijärjestelmän etuja ovat pienet rakennuksen kokonaispainumat ja muuntojoustavuus. Rakennusten välipohjissa ei ole kuormaa välittäviä liitoksia tai poikittaista puuta, koska pystykuormat välittyvät yhtämittaisia pilareita pitkin suoraan perustuksille. Pilari-palkkirunkoisen puukerrostalon kokonaispainuma on samaa luokkaa kuin muilla tekniikoilla kerroksittainen painuma.

Muuntojoustavuus tarkoittaa rakennuksen sisäisten seinien paikkojen muunneltavuutta. Muuntojoustavuutta pystytään hyödyntämään rakennuksen elinkaaren aikana esimerkiksi silloin, kun kaksi asuntoa halutaan yhdistää tai huoneistojen kokoja halutaan myöhemmin muuttaa. Rakennusosien välisiä seiniä voi ääniteknisten syiden takia sijoittaa kuitenkin vain paikkoihin, jossa välipohjarakenne on katkaistu. Huoneistojen välisen seinän voi siten sijoittaa vain palkkilinjalle tai välipohjan päälle välipohjan kantavassa suunnassa. Kevyitä rakennusosien sisäisiä seiniä voi siirtää, poistaa ja rakentaa ilman rajoitteita.

6.5 Liittyvät rakenteet

6.5.1 Parvekkeet

Kaikilla rakentamistekniikoilla optimiparveke on kuvassa 6.17. oleva ulosvedetty, itsensä kantava rakenne. Ulosvedettyjen parvekkeiden ansiosta rakennuksen pohja on suorakulmaisempi, jolloin elementtien määrä ja niiden väliset liitokset vähenevät. Esimerkiksi ulkoseinät voidaan tehdä pitkinä, yhtämittaisina elementteinä. Ulosvedetyt parvekkeet vähentävät ulkovaipan asennusaikaa ja siten myös sääsuojaukskustannuksia.



Kuva 6.17. Ulosvedetty itsensä kantava parvekerakenne

Ulosvedetyt ripustetut parvekkeet ovat seuraavaksi paras vaihtoehto. Ne ovat itsensä kantavia rakenteita huonompia, koska ripustusten ansiosta julkisivun läpäiseviä, välillä vaikeastikin tiivistettäviä liitoksia on enemmän. Ulkoseinärakenteen pitää silloin myös kantaa parvekkeet.

Sisäänvedetyt parvekeratkaisut ovat mahdollisia kaikilla rakentamistekniikoilla. Helpointa ne on toteuttaa kantavat seinät -järjestelmällisillä rakentamistekniikoilla, koska pilari-palkkitekniikalla ulosvedetyt parvekkeet aiheuttavat ylimääräisten ulkoseinäelementtien lisäksi ylimääräisiä pilareita ja palkkeja.

Suurin ongelma puukerrostalojen parvekkeiden rakentamisessa ovat nykyiset palomääräykset. Niiden mukaan parvekkeen kantavat rakenteet voivat olla puuta vain, jos ne suojataan kokonaan palamattomilla materiaaleilla. Edes parvekkeiden varustaminen sprinklereillä ei tuo helpotusta asiaan. Ainut mahdollisuus puun näkymiselle parvekkeissa on toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu. Ongelmaan liittyvä palomääräysten muutostyö on meneillään, joten tulevaisuudessa puun näkyminen parvekerakenteissa saattaa olla paloturvallisuusmääräysten taulukoidenkin mukaan mahdollista. Kuvan 6.17. puiset parvekerakenteet on tehty vanhojen palomääräysten aikaan, jolloin puun näkyminen sallittiin ilman toiminnallista palomitoitusta.

6.5.2 Talotekniikka

Nykyaikaisen puukerrostaloelementin tulisi olla mahdollisimman esivalmistettu, jolloin se sisältäisi myös kaiken mahdollisen talotekniikan. Kuitenkin tämän hetken puu-

kerrostalomodulleista tilaelementti on ainut, jossa on kaikki talotekniset asennukset ja hormit valmiina. Tilaelementtitekniikalla paikalla rakennettavan talotekniikan osuus on vain hormien ja johtojen yhdistämistä ja kytkemistä.

Suurelementti- ja pilari-palkkitekniikoilla Suomessa viime vuosina rakennetuissa puukerrostaloissa talotekniikka on rakennettu vielä pääosin työmaalla. Elementeissä ovat olleet valmiina vain ilmanvaihto- ja vesiputkiin liittyvät varaukset, kuten kuvan 6.18. väliseinäelementissä olevat reiät. Hormit ovat olleet kokonaan paikalla rakennettavia.



Kuva 6.18. Varaukset seinäelementissä [45]

Suurelementteihin on mahdollista asentaa sähköjohdot, -rasiat ja lvi-putket valmiiksi tehtaalla, ja viimeistään tekniikoiden ja suunnittelutyökalujen kehittyessä niin tullaan tekemään. Hormielementtien ja erillisten kylpyhuone-elementtien käyttö on myös mahdollista.

6.6 Puukerrostalomarkkinat

6.6.1 Rakentamissopimukset

Nykyään betonikerrostalourakka on usein jaettu pieniin osiin, jotka pystytään kustannustehokkaan lopputuloksen aikaansaamiseksi kilpailuttamaan. Eri osia ovat esimerkiksi eri elementtien valmistus, elementtien asennus tai perustustyöt. Monien aliurakoitsijoiden ja elementtivalmistajien käyttäminen on ollut mahdollista kehitettyjen betonielementtisysteemien ansiosta, koska eri elementit ovat yhteensopivia ja kaikki urakoitsijat tietävät, kuinka ne asennetaan.

Puukerrostalojen rakentaminen on tällä hetkellä suurimmaksi osaksi tuoteosakauppaa. Tuoteosakauppa tarkoittaa sitä, että koko kerrostalo toteutetaan perustusten päälle rakennettavana yhden toimittajan rakentamana kokonaisuutena eli tuoteosana. Tuoteosa käsittää vähintään rakennuksen rungon ja ulkovaipan sekä rakentamistekniikan ja tuoteosasopimuksen mukaan myös rakennuksen sisäiset rakenteet.

Puuelementtisysteemin tulo on tuonut betonielementtisysteemin tarjoamat mahdollisuudet puukerrostalojen rakentamiseen. Puukerrostalojen rakentaminen on Suomessa kuitenkin vasta alkutekijöissään, ja sen takia vastaavaan kilpailutukseen ei ole vielä päästy. Betonikerrostalorakentamisesta tuttu urakan jakaminen pieniin osiin tulee olemaan tulevaisuudessa arkipäivää suurelementti- ja pilari-palkkitekniikalla rakennetuissa puukerrostaloissa. Tilaelementin suuresta esivalmiudesta ja pienestä rakennuskohtaisesta elementtimäärästä johtuen eri tilaelementtien rakennuttaminen monella toimijalla ei ole järkevää. Tilaelementtitekniikalla rakennettaessa puukerrostalo toteutetaan myös tulevaisuudessa useimmiten tuoteosakauppana.

6.6.2 Puukerrostalotoimittajat

Suomessa on rakennettujen puukerrostalojen pienestä lukumäärästä johtuen vähän puukerrostalon rakentamiseen keskittyneitä toimijoita. Puuhun liittyvien lisäarvojen johdosta tilaaja-rakennuttajaosapuolella on kysyntää puukerrostaloista. Suomessa on lisäksi paljon pientalojen puuelementtejä valmistavia tehtaita, jotka pystyisivät tekemään myös puukerrostaloihin elementtejä.

Suurin pula on osaavista urakoitsijoista. Suuret betonirakentamiseen orientoituneet rakennusurakoitsijat eivät ole lähteneet opettelemaan puukerrostalojen rakentamista. Perinteisen paperi- ja sahateollisuuden kuihtuessa Suomen suurista metsäteollisuuskonserneista Metsä Group ja Stora Enso ovat ottaneet puukerrostalon rakentamisen osaksi liiketoimintaansa. Molemmat toimivat tällä hetkellä pelkästään urakoitsijoina ja myyvät puukerrostaloja tuoteosana.

Metsä Group -konsernin rakentamiseen ja puukerrostaloihin keskittyvä yritys on Metsä Wood. Metsä Woodin puukerrostalo on pilari-palkkitekniikalla rakennettava tuoteosa. Perustoimitukseen kuuluu pilari-palkkirunko ja ulkovaippa. Stora Enson puukerrostaloja rakentava yritys on Stora Enso Building and Living. Se rakentaa CLT-rakenteisia suurelementti- ja tilaelementtipuukerrostaloja. Suurelementtirakenteinen puukerrostalo myydään tavallisesti kantavan puurungon käsittävänä tuoteosana. Tilaelementtikerrostalo sisältää kaikki perustusten päälle tulevat rakenteet.

Metsä Woodin ja Stora Enson lisäksi virolainen Kodumaja on varteenotettava puukerrostalotoimittaja. Kodumaja toimittaa tilaelementtirakenteisia puukerrostaloja. Suomeen Kodumaja ei ole vielä toimittanut puukerrostaloja, mutta Norjaan niitä on viety jo yli kymmenen vuotta. Ruotsissa puukerrostalojen markkinaosuus on 20 prosenttia, mutta ruotsalaiset toimijat eivät ole toistaiseksi kiinnostuneita Suomen puukerrostalomarkkinoista. Ruotsalaisten niukka kiinnostus johtuu pääosin suomessa voimassa olevista rakentamismääräyksistä, jotka ovat ruotsin määräyksiä tiukemmat.

Suomessa on tällä hetkellä vireillä paljon puukerrostalokohteita, joissa on edellä mainittujen yritysten lisäksi mukana myös perinteisiä betonikerrostalourakoitsijoita ja -rakennuttajia. Niistä mahdollisesti saatavat hyvät kokemukset ja edellisessä luvussa mainitut puuelementtisysteemin tuomat mahdollisuudet lisäävät kilpailua ja toimijoita, jotka edesauttavat puukerrostalomarkkinoiden kasvua.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1 Yhteenveto

Puukerrostalo-tutkimuksella oli kaksi päätavoitetta. Ensimmäisenä tavoitteena oli selvittää millainen on turvallinen ja terveellinen puukerrostalo. Puukerrostalon ominaisuuksia määriteltiin rakenneteknisestä näkökulmasta, ja lähtökohtana oli loppukäyttäjien eli ihmisten turvallisuus ja terveys. Käsiteltäviä asioita olivat paloturvallisuus, ääneneristys, puurakenteiden suunnittelu ja kosteuden hallinta. Puurakenteiden suunnitteluosioon liittyi keskeisesti värähtely.

Aineistoa hankittiin kirjallisuusselvitysten ja asiantuntijahaastattelujen avulla. Esitettyjen rakenteellisten ratkaisujen lähtökohtana olivat Suomen rakentamismääräysten mukainen vaatimustaso ja kokemuksesta opitut hyvän rakentamistavan mukaiset ratkaisut. Ominaisuudet ja rakenteelliset ratkaisut kerrottiin kokonaisvaltaisella tasolla. Yksilöllisiä tapauskohtaisia rakenteita ei esitetty.

Toisena tutkimuksen päätavoitteena oli kuvata miten Suomen olosuhteisiin sopiva loppukäyttäjälleen ja rakentajalleen arvoa tuova nykyaikainen puukerrostalo rakennetaan. Arvokkuuden perusteena olivat laatu, virheettömyys, kustannustehokkuus ja kilpailukyky. Niiden toteutumisesta puukerrostalon rakentamisprosessissa pohdittiin yleisellä tasolla teollisen rakentamisen kautta. Pohdinnan perusteina olivat rakennetuista puu- ja betonikerrostaloista saadut kokemukset.

Yksityiskohtaisemmassa rakentamisprosessin tarkastelussa määritettiin modernit rakentamistekniikat ja niiden ominaisuudet. Eri rakentamistekniikoilla toteutettujen puukerrostalojen rakennejärjestelmät ja muut ominaiset piirteet esiteltiin. Rakentamistekniikoiden soveltuvuutta erilaisiin puukerrostaloihin arvioitiin ja niitä vertailtiin toisiinsa.

Puukerrostalon rakentamisprosessiosion yhteydessä mietittiin myös tutkimuksen ensimmäiseenkin tavoitteeseen liittyvää muiden rakennusmateriaalien käyttöä puukerrostalon rakenteissa. Pohdinta rajoitettiin rakenteisiin, jotka ovat puun ominaisuuksista tai Suomen rakentamismääräyksistä johtuen järkevää rakentaa muista materiaaleista.

Teollisessa rakentamisosuudessa käytetty aineisto on peräisin kirjallisuudesta ja asiantuntijahaastatteluista, jotka pohjautuvat lähimaidemme puukerrostalorakentamisesta saatuihin kokemuksiin. Rakentamistekniikoista saatu tieto on ammennettu pääosin Suomessa ja Norjassa tehdyistä kohdevierailuista ja asiantuntijoilta.

Tutkimustulosten perusteella tehtiin puukerrostalo-työkalu. Työkalu on taulukko-pohjainen puukerrostalo-opas, jossa esitetään puurakenteiden ja rakentamistekniikoiden rakennussuunnitteluun tuomat reunaehdot. Siinä vertaillaan eri rakentamistekniikoiden ominaisuuksia ja soveltuvuutta erilaisiin puukerrostaloprojekteihin.

7.2 Turvallinen ja terveellinen puukerrostalo

7.2.1 Paloturvallisuus

Puu palaa hitaasti hiiltymällä. Hiiltyneet pintakerrokset suojaavat sisempää puuta palon edetessä. Hitaan palamisen ja muodostuneen hiilikerroksen ansiosta puurakenteet säilyttävät kantavuutensa hyvin tulipalossa. Puukerrostaloissa on oltava aina automaattinen sammutuslaitteisto, joka sammuttaa tulipalon nopeasti. Hitaasta hiiltyvästä palamisesta ja automaattisen sammutuslaitteiston pakollisuudesta huolimatta lähes kaikki puukerrostalojen pinnat täytyy parvekkeet mukaan lukien palomääräysten mukaan suojata palamattomilla verhouksilla. Suojaverhousvaatimukset perustuvat pääasiassa siihen, että suojaverhottuja puurakenteita ei oteta huomioon palokuormassa, joka puukerrostaloissa on alle 600MJ/m^2 . Oletettuun palonkehitykseen perustuva toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu on ainut palomääräyksissä esitetty keino, jolla on mahdollista vähentää suojaverhouksia edes hieman.

Suojaverhoukset ovat kipsilevyjä. Kipsilevytysten johdosta puukerrostaloissa on enemmän kipsiä kuin puuta ja puurakenteiden esteettisiä ominaisuuksia ei pystytä hyödyntämään. Puuta voi olla näkyvillä sisäpinnoilla vain silloin, jos sen alla on kipsilevyverhous. Nykyiset palomääräykset ovat suojaverhousvaatimusten osalta aivan liian tiukkoja. Ne tuottavat lisäarvoa lähinnä kipsilevytehtailijoille. Määräyksiä tulisi järkevöittää pienentämällä suojaverhousvaatimuksia varsinkin massiivisten puurakenteiden ja parvekkeiden osalta sekä ottamalla suojaamattomat puurakenteet huomioon palokuormassa. Automaattisten paloturvallisuustoimenpiteiden toimintavarmuuden painoarvoa tulisi lisätä, koska ne sammuttavat tulipalon aina toimiessaan.

7.2.2 Ääneneristys

Puukerrostaloissa syntyy ilmassa kulkevia ilmaääniä ja askelista aiheutuvia askelääniä. Ihminen kokee liian kovat äänet erittäin häiritseviksi. Siksi ääneneristys on tärkein terveellisen ja viihtyisän puukerrostalon suunnittelussa huomioitava ominaisuus. Puu on itsessään keveytensä vuoksi huono ääneneriste. Pelkillä puurakenteilla ei pystytä täyttämään ääneneristysvaatimuksia.

Ilmaääniä eristävät rakenteet ovat rakennusosien välisiä seiniä ja välipohjia. Niiden ilmaääneneristys toteutetaan tekemällä rakenteista kaksiosaisia ja lisäämällä massaa tuovia materiaaleja rakenteen molempiin pintoihin. Rakenne on niin sanottu massajousi-massarakenne, jossa massojen välissä oleva ilma toimii jousena, joka heikentää ääntä. Ääntä eristävien puukerrostalorakenteiden ilmapöly täytetään ääntä absorboivalla materiaalilla.

Askelääniä eristävät rakenteet ovat rakennusosien välisiä välipohjia. Askeläänien vaimentamiseksi välipohjien pinnassa pitää olla massiivinen erillinen pintakerros, joka on erotettu kantavasta välipohjarakenteesta ja seinistä. Erillinen pintakerros estää askelista aiheutuvan kopinan siirtymisen sivuavia rakenteita pitkin tilasta toiseen. Lisäksi eri rakennusosien välillä ei saa olla yhtenäisiä rakenteita sivutiesiirtymien välttämiseksi.

Äänen monimutkaisien ominaisuuksien ja ääneneristävyyden tärkeyden takia puukerrostalon ääniä eristävien rakenteiden on oltava edellä mainittujen periaatteiden mukaisia. Massan lisääminen johtaa seinissä ja välipohjien alapinnoissa kipsilevyjen käyttöön ja kaksoisrakenteellisuus paksuihin rakennusosien välisiin seiniin, jotka syövät myytävää rakennusala. Välipohjien pinnoille on tehtävä erillinen askelääniä eristävä pintavalu.

7.2.3 Puurakenteiden suunnittelu

Puu on kevyt, luja ja elastinen materiaali. Se taipuu ja vääntyy huomattavasti ennen kuin murtuu. Puukerrostalon rakenteet on suunniteltava siten, että rasituksista aiheutuvat muodonmuutokset eivät ole ihmistä häiritseviä tai liittyviä rakenteita rikkovia. Muodonmuutoksista ei aiheudu haittaa lyhyillä pystysuuntaan kuormitetuilla pystyrakenteilla. Ne nousevat ratkaiseviksi pitkällä taivutetuilla vaakarakenteilla, joita ovat yläpohja- ja välipohjarakenteet. Pitkäaikainen kuormitus aiheuttaa vaakarakenteisiin taipumaa, ja jaksottaiset kävelystä aiheutuvat iskut taivuttavat hetkellisesti välipohjarakennetta ja saavat sen värähtelemään.

Koko puukerrostalorakentamisen suurin ongelma on välipohjien värähtely. Välipohjan ominaistaajuuden pitää olla riittävän suuri, jotta se ei ala kävelyn aiheuttamien jaksottaisten iskujen vuoksi värähdellä. Ominaistaajuus on pieni elastisilla ja painavilla rakenteilla, joihin ääniteknisesti toimiva pintavalullinen välipohja kuuluu. Jännevälin kasvattaminen pienentää ominaistaajuutta. Puurakenteiden välipohjien ominaistaajuutta voidaan nostaa kasvattamalla jäykkyyttä eli rakennekaksuutta ja lyhentämällä jänneväliä. Siksi puukerrostalojen välipohjarakenteet ovat paksuja ja lyhyitä. Paksuus ja lyhyet jännevälit lisäävät kerroskorkeutta ja kantavia rakenteita, tuovat rajoituksia tilasuunnitteluun sekä nostavat rakentamiskustannuksia. Puukerrostalon välipohjan maksimijänneväli on noin seitsemän metriä.

Yksi ratkaisu puukerrostalojen välipohjien jännevälin pidentämiseen on komposiittirakenne välipohja. Se on betonista ja puusta tehty liittorakenne, jossa pintabetoni vastaanottaa puristusvoimat ja puu vetovoimat. Puu-betonivälipohja on erittäin käyttökelpoinen rakenne, jos rakenteelta ei vaadita hyviä ääneneristysominaisuuksia, koska liittovaikutuksen aikaansaamiseksi pintavalun ja puurakenteen välissä ei voi olla erillistä pintabetonia erottavaa kerrosta. Riittävä ääneneristys on silloin toteutettava pintabetonin päälle rakennettavalla kelluvalla lattiarakenteella. Puu-betoniliittorakenteella voidaan päästä noin 20 prosenttia pidempiin jänneväleihin.

Ympäristönsuojeluasioita huomioimatta puun suurin etu verrattuna perinteiseen teräsbetoniin on sen keveys. Puukerrostalo painaa vain noin viidesosan vastaavan betonikerrostalon painosta. Asuin- ja työpaikkarakennusten hyötykuormat ja kaikkien kuormien varmuuskertoimet huomioiden puukerrostalon perustuksille tulevat kuormat ovat noin puolet betonikerrostalon kuormista. Puukerrostalon keveyttä voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi heikolle maaperälle tai tunneleiden päälle rakennettaessa.

7.2.4 Kosteuden hallinta

Puu on kosteudelle altis, vettä imevä materiaali, joten puukerrostalon rakenteet on suojattava kosteudelta. Kosteusteknisessä suunnittelussa on otettava huomioon kolme asiaa. Rakenteet on suojattava suoralta ulkopuoliselta kostumiselta pinnalla, joka on erotettu sisäpuolisista rakenteista tuulettuvalla ilmavälillä. Tuuletusvälin sisäpuolella pitää olla kosteutta kestävä tuulensuojakerros. Sisäpuolisen kosteuden pääsy rakenteisiin pitää estää höyrynsulkukerroksella.

Suojaavan julkisivun ja tuulensuojakerroksen toteuttaminen on suhteellisen yksinkertaista. Vaikeinta on varmistaa sisäpuolisen höyrynsulun yhtenäisyys elementtien liitoskohdissa. Liitosten pitää olla sellaisia, että ne voidaan tiivistää helposti erilliseen tiivistysvaraukseen pursotettavalla materiaalilla. Vanhanaikaisia teippitiivistyksiä ei tule käyttää.

7.3 Teollinen rakentaminen

Loppukäyttäjälleen ja rakentajalleen arvoa tuova nykyaikainen puukerrostalo on laadukas ja virheetön sekä kustannustehokkaasti ja nopeasti rakennettu kokonaisuus. Laatu ja virheettömyys eivät perustu valvonnan lisäämiseen eivätkä kustannustehokkuus ja nopeus työtahdin nopeuttamiseen. Ne perustuvat kaikki rakentamisprosessissa olevan hukan eli kaiken turhan ja arvoa lisäämättömän työn poistamiseen. Hukan poistaminen on työympäristön olosuhteiden parantamista, työn systemaattista, jatkuvaa parantamista ja työn vakiinnuttamista. Rakentamisprosessissa oleva turha työ voidaan poistaa vain teollisen rakentamisen ja jatkuvan kumppanuuden avulla.

Teollinen rakentaminen tarkoittaa rakentamistyön siirtämistä aina valoisiin, lämpiimiin sekä työmaaolosuhteisiin nähden siisteihin ja ergonomisiin tehdasolosuhteisiin. Tehdastyöskentely on vakiintunutta, joten sitä pystytään jatkuvasti tehostamaan ja parantamaan. Laadunvarmistus on helppoa, koska työtä pystytään paremmin valvomaan ja siten voidaan estää virheiden syntyminen. Teollinen puukerrostalorakentaminen on modulaarista rakentamista eli elementtirakentamista. Tehtaalla rakennettavat elementit ovat mahdollisimman pitkälle esivalmistettuja. Ne sisältävät lähes kaikki valmiilta rakennukselta vaadittavat ominaisuudet, kuten ikkunat, ulko- ja sisäverhouksen ja talotekniikan. Työmaalla tapahtuva rakentaminen on vain elementtien liittämistä toisiinsa. Suomen huonojen sääolojen ja puun ominaisuuksien johdosta puukerrostalon työmaa-ajan tulee olla erittäin lyhyt. Lyhyen työmaa-ajan saavuttamiseksi puukerrostalon pitää olla rakennettava. Rakennettavan puukerrostalon elementit ovat mahdollisimman esivalmistettuja, nopeasti ja helposti liitettäviä sekä yhteensopivia. Liitettävyys ja yhteensopivuus saavutetaan standardoidulla avoimella rakentamisjärjestelmällä, joka vakioi elementtien liittämisen.

Jatkuva kumppanuus saavutetaan liian kilpailutuksen poistamisella ja rakentamisosapuolten välisillä pidempiaikaisilla ja tasavertaisilla yhteistyösopimuksilla. Työn systemaattinen jatkuva parantaminen ja työn vakiinnuttaminen ovat mahdollisia, kun

samalla rakentamisorganisaatiolla tehdään useampi projekti. Osapuolten projektikohtainen vaihtuminen johtaa siihen, että yhteiset toimintamallit joudutaan miettimään aina uudelleen. Silloin kaikki tekevät vain oman urakkansa ajattelematta lainkaan kokonaisuutta.

Suomessa on tämän vuoden alkupuolella julkaistu ensimmäinen avoin puurakentamisstandardi Runko-PES. Se vakioi puuelementtien liitosperiaatteet ja moduuliviivojen aseman suhteessa rakenteeseen. Liitosperiaatteiden vakiointi mahdollistaa rakennettavan puukerrostalon, koska vakioitujen liitosten ansiosta eri elementtitehtailijoiden ja urakoitsijoiden osallistuminen uusiin puukerrostaloprojekteihin on teknisten rakenteellisten asioiden osalta mahdollista.

Suurin puukerrostalorakentamisen tulevaisuuden haaste on koko rakentamisprosessin kehittäminen, joka edellyttää jatkuvaa kumppanuutta. Nykykerrostalorakentamisen jatkuva kilpailutus ja yhteistyökumppaneiden vaihtaminen johtavat vain yksittäisten urakoiden kustannusten pienenemiseen, vaikka todellisuudessa kokonaiskustannukset voivat olla suurempia yhteistyön puutteesta johtuvien virheiden ja oman edun tavoittelun johdosta. Kustannustehokkaita ja kilpailukykyisiä puukerrostaloja saadaan aikaan, kun eri osapuolet sitoutuvat tekemään kumppaneina useita projekteja yhdessä.

7.4 Rakentamistekniikat

7.4.1 Yleistä

Nykyaikainen puukerrostalo voidaan rakentaa kolmella eri rakentamistekniikalla. Ne perustuvat kaikki teollisesti esivalmistettuihin elementteihin. Tekniikoita ovat suurelementti-, tilaelementti- ja pilari-palkkiteknikka. Suur- ja tilaelementtitekniikoilla rakennetun puukerrostalon rakennejärjestelmä on kantavat seinät –järjestelmä, ja pilari-palkkiteknikalla pilari-palkkijärjestelmä. Kantavat seinät –järjestelmässä kuormat siirtyvät perustuksille kantavien ja jäykistävien seinien välityksellä. Perustukset ovat jatkuvia seinälinjojen alapuolella olevia rakenteita. Pilari-palkkijärjestelmä perustuu momenttijäykästi perustuksiin kiinnitettäviin mastopilareihin ja niiden väliin tuleviin palkkeihin. Pilari-palkkirakenteinen puukerrostalo perustetaan pilarianturoille.

7.4.2 Suurelementti

Suurelementtitekniikalla puukerrostalo kootaan kerros kerrallaan yksittäisistä, kerroksen korkuisista seinistä sekä niiden väliin asennettavista välipohja- ja yläpohjaelementeistä. Rakentaminen vastaa suurelta osin betonielementtirakentamista. Suurelementtitekniikka on rakennussuunnittelun kannalta joustava, koska yksittäisiä seiniä voidaan asentaa monimutkaistenkin tilojen mukaan ja kantavat rakenteet ovat seinien sisällä, jolloin ne eivät vie ylimääräistä kerrosalaa.

Suurelementtitekniikan suurin miinus on sen pitkä, sääoloille altis työmaa-aika, joka johtuu kerroksellisesta rakentamisesta. Rakenteet pitää sääsuojata työmaa-ajan yksittäisiä suojapeitteitä ja väliaikaisia vesikattoja käyttäen tai kalliilla täyshuputuksella. Suure-

lementtijärjestelmän ainut tilasuunnittelurajoitus koskee kantavien seinien sijoittelua. Niiden väli on välipohjien värähtelymitoituksen takia enintään 7 metriä. Järjestelmällä on siksi mahdotonta rakentaa suuria avoimia tiloja ja muuntojoustavuus on kohtalaisen huono. Suurelementtitekniikka sopii parhaiten asuinrakentamiseen.

7.4.3 Tilaelementti

Tilaelementtitekniikka on rakentamistapa, jossa puukerrostalo kootaan itsenäisistä, seinät, lattian ja katon sisältävistä suorakulmaisista tilayksiköistä eli tilaelementeistä. Tilaelementit ovat mahdollisimman pitkälle esivalmistettuja. Ne sisältävät kaikki kiinteät kalusteet ja koneet sekä valmiit sisäpinnat. Tilaelementin maksimileveys on rakenteellisten ja logististen seikkojen takia 5 metriä. 5 metrin levyisen elementin korkeus on 3,2 ja maksimipituus noin 15 metriä.

Tilaelementtien kokorajoitusten vuoksi tekniikalla rakennettavien puukerrostalojen tiloista tulee yleensä suorakulmaisia ja kantavia seinälinjoja on vähintään viiden metrin välein. Kantavat seinät ovat aina tekniikasta johtuen kaksoisrakenteisia. Kantavien seinien suuri määrä rajoittaa tilasuunnittelua, ja kaksoisrakenteellisuus syö myytävää kerrosalaa. Tilaelementtirakenteisen puukerrostalon muuntojoustavuus on huono. Tilaelementtitekniikka soveltuu vain asuinrakentamiseen.

Tilaelementtitekniikan suurin hyöty on erittäin lyhyt työmaa-aika. Koko kerrostalo kootaan parissa viikossa, ja rakennus on muuttovalmis 1–2 kuukauden kuluttua työmaan alkamisesta. Nopea rakentaminen mahdollistaa tilaajalle tehokkaan pääoman hyödyntämisen. Tilaelementin suuren esivalmiuden takia suunnitelmien tulee olla selvillä todella aikaisessa vaiheessa, koska muutoksia ei voida tehdä enää työmaalla. Esivalmius johtaa kuitenkin korkeaan laatuun ja pieneen virheiden määrään, jotka ovat erittäin tärkeitä ominaisuuksia loppukäyttäjien kannalta.

7.4.4 Pilari-palkki

Pilari-palkkirakenteinen puukerrostalon runko rakennetaan pitkistä, monen kerroksen korkuisista pilareista ja niiden väliin asennettavista palkeista. Kantava runko rakennetaan ensin ylös asti ja sen jälkeen sen päälle asennetaan yläpohjaelementit ja vesikatto. Katon jälkeen asennetaan välipohja- ja ulkoseinäelementit rakennusosa kerrallaan. Väliseinät paikalla rakennetaan viimeisimpänä.

Pilari-palkkitekniikalla ei ole muista tekniikoista poiketen pakollisia tilasuunnittelua rajoittavia tekijöitä, koska kantavat rakenteet eivät ole seinien sisällä. Monimutkaiset tilat ovat mahdollisia, mutta niitä ei ole järkevää toteuttaa, koska ne lisäävät kantavia linjoja ja paikalla rakennettavia seiniä. Erilliset kantavat rakenteet tekevät tekniikalla rakennetusta puukerrostalosta muuntojoustavan, ja pitkien pilareiden ansioista rakennuksessa ei esiinny painumia.

Elementtien asennusjärjestyksen vuoksi rakennuksen ulkovaippa saadaan nopeasti tiiviiksi, jolloin erillistä sääsuojaa ei tarvita. Asennusjärjestys johtaa kuitenkin väliseinien paikalla rakentamiseen, joka pidentää rakentamisaikaa. Rakennesuunnittelun kannal-

ta tekniikan mastopilarijäykistys on ongelmallista, koska se johtaa massiivisiin perustuksiin vaikka todellisuudessa pilareiden väliin asennettavat ulkoseinäelementit jäykistävät myös rakennusta. Tekniikka soveltuu asuin- ja työpaikkarakennuksiin.

LÄHTEET

- [1] Heikkilä-Kauppinen M. & Kauppinen T. Ympäristöopas 39, Rakennusten paloturvallisuus & Turvallisuus korjausrakentamisessa. 2. painos. Helsinki 2003, Ympäristöministeriö. 166 s.
- [2] Karjalainen M. Puurakentamisen asema Suomessa [WWW]. Puuinfo Oy. [viitattu 20.12.2012]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/modernit-puukaupungit/puun%20asema%20rakentamisessa>.
- [3] Valmistuneet puukerrostalot [WWW]. Puuinfo Oy. [viitattu 21.12.2012]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/valmistuneet-puukerrostalot>.
- [4] Siikanen U. Puurakentaminen. Helsinki 2008, Rakennustieto Oy. 331 s.
- [5] Viljakainen M. Puukerrostalo. Tampere 1997, Tampereen teknillinen korkeakoulu & Puuinfo Oy. 87 s.
- [6] Ulrich R B. Roman Woodworking. New Haven, USA 2007, Yale University. 385 s.
- [7] Kohl R. Deutschland: Fachwerk – Lich [WWW]. Deutschland – Bild des Tages. [viitattu 25.1.2013]. Saatavissa: <http://deutschland.yakohl.com/pop.php?pid=360>.
- [8] Karjalainen M, Heikkilä J, Koiso-Kanttila J, Kilpeläinen M. Suomalainen Puukerrostalo. 1. painos. Helsinki 1997, Opetushallitus. 160 s.
- [9] Karjalainen M. Suomalainen puukerrostalo puurakentamisen kehittämisen etulinjassa. Väitöskirja. Oulu 2002, Oulun yliopisto, Arkkitehtuurin osasto. Acta Universitatis Ouluensis C 166. 422 s.
- [10] Tulevia puukerrostalo kohteita [WWW]. Puuinfo Oy. [viitattu 28.1.2013]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/tulevia-puukerrostalo kohteita>.
- [11] Paloteknisiä ominaisuuksia [WWW]. Puuinfo Oy. [viitattu 7.2.2013]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/puu-materiaalina/paloteknisia-ominaisuuksia>.
- [12] RIL 205-2-2009 Puurakenteiden suunnitteluohje. Helsinki 2009, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 90 s.
- [13] RakMk E1. Rakennusten paloturvallisuus, Määräykset ja ohjeet 2011. Helsinki 2011, Ympäristöministeriö. 43 s.
- [14] Paloturvallisuussuunnittelijan oppimisympäristö [WWW]. VTT. [viitattu 7.2.2013]. Saatavissa: http://proxnet.vtt.fi/fise/simon/Fise/opetusmateriaali/fise_etusivu.html.
- [15] Pintojen ja katteiden paloluokat, Tekninen tiedote. 2012, Puuinfo Oy. 8 s.
- [16] Härkönen M. Kostean puun energiasisältö [WWW]. 2011, Metsäntutkimuslaitos. Forest Power-projektitiedote 1018. 2 s. [viitattu 13.2.2013]. Saatavissa: http://www.forestpower.net/data/liitteet/112231=1018_kostean_puun_energiasisalto.pdf.
- [17] CEA 4001:2007-06 (fi). Sprinklerilaitteistot, Suunnittelu ja asentaminen. Bryssel 2007, Comité Européen des Assurances. 193 s.

- [18] Kerrostalojen asuntosprinklaus [WWW]. Puuinfo Oy. [viitattu 14.2.2013]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/puurakentamisen-roadshow-2012-luentoaineistot/kerrostalojen-asuntosprinklaus-web.pdf>.
- [19] HI-FOG for buildings, Technical introduction. 2011, Marioff Corporation Oy. 16 s.
- [20] Toiminnallinen palomitoitus. Helsinki, Helsingin rakennusvalvontavirasto, Helsingin kaupunki, Microsoft PowerPoint -esitys. 2 s.
- [21] Kylliäinen M. Talonrakentamisen akustiikka. Tampere 2006, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos, Tutkimusraportti 137. 205 s.
- [22] Lahtela T. Ääneneristys puutalossa. 2004, Wood Focus Oy. 110 s.
- [23] RakMk C1. Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa, Määräykset ja ohjeet 1998. Helsinki 1998, Ympäristöministeriö. 9 s.
- [24] Rakennetyyppikirjastot [WWW]. Puuinfo Oy. [viitattu 27.2.2013]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/rakennetyyppikirjastot>.
- [25] RIL 205-1-2009 Puurakenteiden suunnitteluohje. Helsinki 2009, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 271 s.
- [26] Talja A, Toratti T, Järvinen E. Lattioiden värähtelyt, Suunnittelu ja kokeellinen arviointi. Espoo 2002, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2124. 50 s.
- [27] Puurakenteiden suunnittelu, Lyhennetty suunnitteluohje, Kolmas painos, Eurokoodi 5 [WWW]. Puuinfo Oy. [viitattu 27.2.2013]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/eurokoodit/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnittelu/eurokoodi-5-lyhennetty-suunnitteluohje-www-kolmas-painos-1492011.pdf>.
- [28] Puun rakenne [WWW]. PuuProffa ry. [viitattu 20.3.2013] Saatavissa: http://www.puuproffa.fi/proffin/index.php?option=com_content&task=view&id=14&Itemid=29.
- [29] Lahdensivu J, Suonketo J, Vinha J, Lindberg R, Manelius E, Kuhno V, Saastamoinen K, Salminen K, Lähdesmäki K. Matalaenergia- ja passiivitalojen rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeita. Tampere 2012, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 160. 121 s.
- [30] RunkoPES, Rungon puuelementtistandardi, luento 1, Perusteet. Lahtela T. Puurakenteiden RoadShow 2013. Microsoft PowerPoint -esitys. 82 s.
- [31] Puurakentamisen merkittävä puute poistuu: Alalle vihdoin yhtenäinen avoin standardi [WWW]. Puuinfo Oy. [viitattu 8.3.2013]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/ajankohtaista/puurakentamisen-merkittava-puute-poistuu-alalle-vihdoin-yhtenainen-avoin-standardi>.
- [32] Kouri I. Lean taskukirja. Helsinki 2010, Teknologiateollisuus ry, 38 s.
- [33] Björnfort A. Modular Long-Span Timber Structures – a Systematic Framework for Buildable Construction. Licentiate Thesis. Luleå 2004, Luleå University of

- Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Thesis number 2004:34. 48 s.
- [34] Elementtirakentamisen historia [WWW]. Betoniteollisuus ry. [viitattu 8.3.2013]. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/valmisosarakentaminen/elementtirakentamisen-historia>.
 - [35] Runko-PES 1.0. [WWW]. Finnish Wood Research Oy. [viitattu 8.3.2013]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/runkopes>.
 - [36] Kilpeläinen M, Ukonmaanaho A, Kivimäki M. Avoin puurakennusjärjestelmä – elementtirakenteet. Vammala 2001, Wood Focus Oy. 119 s.
 - [37] Kerrostalojärjestelmä [WWW]. Metsä Wood. [viitattu 18.3.2013]. Saatavissa: <http://www.metsawood.fi/ammattirakentaminen/kerrostalojarjestelma/Pages/Default.aspx?TMI=topMenuContainer3>.
 - [38] Kodumajan kerrostalot [WWW]. Kodumaja AS. [viitattu 20.3.2013] Saatavissa: <http://www.kodumaja.ee/fi/Rakennustapa-ja--teknologia/Prosessi-kuvina>.
 - [39] MassivHolzMauer [WWW]. Massiv-Holz-Mauer Entwicklungs GmbH. [viitattu 12.3.2013]. Saatavissa: <http://www.massivholzmauer.de/>.
 - [40] Stora Enso Building and Living. Stora Enso Building Solutions CLT, product catalogue [WWW]. Stora Enso Oyj. [viitattu 13.3.2013]. Saatavissa: <http://www.clt.info/index.php?id=6&L=2>.
 - [41] Renholm K, Nyholm M, Hyttinen A, Tapio P. Gyproc Käsikirja, Kevytrakennusjärjestelmät. Hyvinkää 2012, Saint-Gobain Rakennustuotteet Oy. 495 s.
 - [42] Fragiaco M, Lukaszewska E. Development of prefabricated timber-concrete composite floor systems [WWW]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings 164 April 2011 issue SB2. Institution of Civil Engineers. 13 s.
 - [43] Runkojärjestelmän vaikutukset puukerrostalon arkkitehtisuunnitteluun [WWW]. Puuinfo Oy. [viitattu: 8.4.2013]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/rakentaminen/suunnitteluohjeet/runkojarjestelman-vaikutukset-arkkitehtisuunnitteluun>.
 - [44] Jäykistysjärjestelmät [WWW]. Betoniteollisuus ry. [viitattu: 8.4.2013]. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistys/jaykistysjarjestelmat>.
 - [45] Puuera, Suomen ensimmäinen 5-kerroksinen puukerrostalo [WWW]. Saatavissa: <http://www.puera.fi/>.
 - [46] Byggsystem för framtidens naturliga sätt att bygga [WWW]. Martinsons. [viitattu: 11.4.2013] Saatavissa: <http://www.martinsons.se/default.aspx?id=7036>.
 - [47] Rationellt byggande – Sunt boende [WWW]. Lidbäcks Bygg. [viitattu: 12.4.2013]. Saatavissa: <http://www.lindbacks.se/bygg/page324.php?action=play&nid=42>.
 - [48] Lakea Kiinteistöt Oy – Lintuviita 2. Seinäjoki 2013, Lakea Kiinteistöt Oy, Arkkitehtuuritoimisto AT. Pääpiirustus, 2. kerroksen pohja.

- [49] Metsä Wood kerrostalojärjestelmäesite. Lahti 2013, Metsä Wood. 12 s.
- [50] Viikin latokartanon puukerrostalokortteli. 2011, Metsä Wood. Kuvia rakentamisesta.
- [51] Viikin latokartanon puukerrostalokortteli. 2011, Keskinäinen eläkevakuutusyhdistö Etera, Arkkitehtitoimisto HMT Oy. Pohjapiirustus.

LIITE 1: HAASTATTELUT

Pvm.	Paikka	Henkilö	Titteli	Yritys
20.9.2012	Hartola	Matti Sinivirta	Projektipäällikkö	Stora Enso Building and Living
		Jukka Pulkkinen	Rakennesuunnittelija	Stora Enso Building and Living
		Timo Welling	Arkkitehti	Stora Enso Building and Living
27.9.2012	Helsinki	Tero Lahtela	Rakennusinsinööri	Insinööritoimisto Lahtela Oy
5.10.2012	Helsinki	Mikko Viljakainen	Toimitusjohtaja	Puuinfo Oy
16.10.2012	Helsinki	Harri Järvinen	Vastaava mestari	NCC Rakennus Oy
25.10.2012	Espoo	Jaakko Länsiluoto	Kehitys- ja suunnittelupäällikkö	MetsäWood
2.11.2012	Helsinki	Arto Hyttinen	Tuotepäällikkö	Saint-Gobain rakennustuotteet Oy
7.11.2012	Kannonkoski	Esa Kosonen	Johtaja, Rakentamisen ratkaisut	MetsäWood
		Jari Bremer	Johtaja, Projektimyynti Suom	MetsäWood
		Jaakko Länsiluoto	Kehitys- ja suunnittelupäällikkö	MetsäWood
26.11.2012	Heinola	Pekka Kopra	Toimitusjohtaja	Versowood
		Tero Vesanen	Liiketoimintajohtaja	Versowood
27.11.2012	Joensuu	Janne Manninen	Aluejohtaja	Stora Enso Building and Living
		Mauri Konttila	Tekninen johtaja	Stora Enso Building and Living
		Simo Hakkarainen	Projektipäällikkö	Stora Enso Building and Living
11.12.2012	Vantaa	Jaakko Kääriäinen	Kehityspäällikkö	Marioff Corporation Oy
30.1.2013	Trondheim	Andrus Leppik	Markkinointi- ja myyntijohtaja	AS Kodumaja
20.3.2013	Turku	Tom Mattson	Rakennustarkastusinsinööri	Turun kaupunki
22.3.2013	Turku	Pekka Mutikainen	Johtava palotarkastaja	Tampereen kaupunki
26.3.2013	Turku	Kirsi Rontu	Tarkastusinsinööri	Helsingin kaupunki

Haastattelut

Pvm.	Paikka	Tapahtuma	Järjestävä organisaatio
11.10.2012	Helsinki	FinnBuild, Puurakentamisseminaari	Puuinfo Oy
29.11.2012	Helsinki	Puupäivä	Puuinfo Oy
22.3.2013	Helsinki	TEPUTU II-asiantuntijatyöpaja	Finnish Wood Research Oy, RYM Oy
9.4.2013	Turku	Puurakentamisen RoadShow 2013	Puuinfo Oy
7.5.2013	Vantaa	Puurakentamisen kehittämistyöpaja	Tekes, Työ- ja elinkeinoministeriö

Seminaarit

LIITE 2: VÄRÄHTELY- JA TAIPUMALASKUT

Palkin ominaisuudet (Kerto-S):

$$l_p := 4000 \quad h_w := h_w \quad b_w := 51 \quad s_p := 400 \quad E_{\text{mean.p}} := 13800$$

Pintalevyn ominaisuudet (paksuviiluinen havuvaneri):

$$h_f := 21 \quad b_{\text{cef}} := \min(0.1 \cdot l_p, 20 \cdot h_f) = 400 \quad b_{\text{ef}} := \min(b_{\text{cef}} + b_w, s_p) = 400$$

$$E_{\text{mean.fc}} := 5290 \quad E_{\text{mean.fm}} := 8230$$

Jäykkyyksien suhteen laskettu neutraaliakseli:

$$k_E := \frac{E_{\text{mean.p}}}{E_{\text{mean.fc}}} = 2.609 \quad y_0 := \frac{b_{\text{ef}} \cdot h_f \cdot \frac{h_f}{2} + k_E \cdot b_w \cdot h_w \cdot \left(h_f + \frac{h_w}{2} \right)}{b_{\text{ef}} \cdot h_f + k_E \cdot b_w \cdot h_w}$$

Palkin taivutusvastus:

$$I_p := \left[\frac{b_w \cdot h_w^3}{12} + b_w \cdot h_w \cdot \left(\frac{h_w}{2} + h_f - y_0 \right)^2 \right] \quad EI_p := E_{\text{mean.p}} \cdot I_p$$

Pintalevyn taivutusvastus:

$$I_f := \left[\frac{b_{\text{ef}} \cdot h_f^3}{12} + b_{\text{ef}} \cdot h_f \cdot \left(y_0 - \frac{h_f}{2} \right)^2 \right] \quad EI_f := E_{\text{mean.fc}} \cdot I_f \quad EI_{fB} := E_{\text{mean.fm}} \cdot \frac{b_{\text{ef}} \cdot h_f^3}{12} = 2.541 \times 10^9$$

Liimatun laattapalkin taivutusvastus:

$$EI_T := EI_f + EI_p$$

Pintabetonin taivutusvastus:

$$h_c := h_c \quad I_c := \frac{s_p \cdot h_c^3}{12} \quad E_c := 20000 \quad EI_c := E_c \cdot I_c$$

Kokonaistaivutusvastus:

$$EI_L := EI_T + EI_c$$

Lattian pitkäaikaismassa:

$$g_k := 0.5 \cdot 10^{-3} + h_c \cdot 25 \cdot 10^{-6} \quad q_k := 2 \cdot 10^{-3} \quad \psi_2 := 0.3 \quad g_p := 9807 \quad m_p := \frac{g_k + \psi_2 \cdot q_k}{g_p}$$

Lattian taajuus:

$$l_p := l_p$$

$$f_1(h_w, l_p, h_c) := \frac{\pi}{2 \cdot l_p^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{s_p \cdot m_p}}$$

Lattiapalkin korkeus, kun lattian taajuus on 9Hz:

Ilman pintavalua:

$f_1(h_w, l_p, h_c) = 9$	substitute, $l_p = 4000$ substitute, $h_c = 0$ solve, h_w assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	$\rightarrow 142.48740487346231743$
$f_1(h_w, l_p, h_c) = 9$	substitute, $l_p = 5000$ substitute, $h_c = 0$ solve, h_w assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	$\rightarrow 203.26860079922134072$
$f_1(h_w, l_p, h_c) = 9$	substitute, $l_p = 6000$ substitute, $h_c = 0$ solve, h_w assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	$\rightarrow 269.48061658094236723$
$f_1(h_w, l_p, h_c) = 9$	substitute, $l_p = 7000$ substitute, $h_c = 0$ solve, h_w assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	$\rightarrow 340.30797975284821119$
$f_1(h_w, l_p, h_c) = 9$	substitute, $l_p = 8000$ substitute, $h_c = 0$ solve, h_w assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	$\rightarrow 415.16211710315341043$
$f_1(h_w, l_p, h_c) = 9$	substitute, $l_p = 9000$ substitute, $h_c = 0$ solve, h_w assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	$\rightarrow 493.60557702351622998$
$f_1(h_w, l_p, h_c) = 9$	substitute, $l_p = 10000$ substitute, $h_c = 0$ solve, h_w assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	$\rightarrow 575.30238461809427536$

60mm:n pintavalulla:

$$f_1(h_w, l_p, h_c) = 9 \quad \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } l_p = 4000 \\ \text{substitute, } h_c = 60 \\ \text{solve, } h_w \\ \text{assume, } h_w = \text{RealRange}(0, \infty) \end{array} \right. \rightarrow 187.27227188613155573$$

$$f_1(h_w, l_p, h_c) = 9 \quad \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } l_p = 5000 \\ \text{substitute, } h_c = 60 \\ \text{solve, } h_w \\ \text{assume, } h_w = \text{RealRange}(0, \infty) \end{array} \right. \rightarrow 275.97980202056545859$$

$$f_1(h_w, l_p, h_c) = 9 \quad \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } l_p = 6000 \\ \text{substitute, } h_c = 60 \\ \text{solve, } h_w \\ \text{assume, } h_w = \text{RealRange}(0, \infty) \end{array} \right. \rightarrow 368.26446345289730651$$

$$f_1(h_w, l_p, h_c) = 9 \quad \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } l_p = 7000 \\ \text{substitute, } h_c = 60 \\ \text{solve, } h_w \\ \text{assume, } h_w = \text{RealRange}(0, \infty) \end{array} \right. \rightarrow 465.12092065282268087$$

$$f_1(h_w, l_p, h_c) = 9 \quad \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } l_p = 8000 \\ \text{substitute, } h_c = 60 \\ \text{solve, } h_w \\ \text{assume, } h_w = \text{RealRange}(0, \infty) \end{array} \right. \rightarrow 566.51801717618540723$$

$$f_1(h_w, l_p, h_c) = 9 \quad \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } l_p = 9000 \\ \text{substitute, } h_c = 60 \\ \text{solve, } h_w \\ \text{assume, } h_w = \text{RealRange}(0, \infty) \end{array} \right. \rightarrow 672.21400665668686014$$

$$f_1(h_w, l_p, h_c) = 9 \quad \left| \begin{array}{l} \text{substitute, } l_p = 10000 \\ \text{substitute, } h_c = 60 \\ \text{solve, } h_w \\ \text{assume, } h_w = \text{RealRange}(0, \infty) \end{array} \right. \rightarrow 781.93809400018395461$$

Lattian hetkellinen taipuma 1kN:n kuormasta:

$$EI_B := E_{\text{mean.fm}} \cdot \frac{b_{\text{ef}} \cdot h_f^3}{12} + EI_C$$

$$B := 10000 \quad k_\delta := \sqrt[4]{\frac{EI_B}{EI_L}} < \frac{B}{l_p} \quad F_1 := 1000$$

$$f_2(h_w, l_p, h_c) := \frac{F_1 \cdot l_p^2}{42 \cdot k_\delta \cdot \frac{EI_L}{s_p}}$$

Lattiapalkin korkeus 0.50 millimetrin hetkellisellä taipumalla:

Ilman pintavalua:

	substitute, $l_p = 4000$	
$f_2(h_w, l_p, h_c) = 0.50$	substitute, $h_c = 0$	$\rightarrow 245.8789967115233948$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
	substitute, $l_p = 5000$	
$f_2(h_w, l_p, h_c) = 0.50$	substitute, $h_c = 0$	$\rightarrow 308.5147623587224081$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
	substitute, $l_p = 6000$	
$f_2(h_w, l_p, h_c) = 0.50$	substitute, $h_c = 0$	$\rightarrow 370.25620123306059967$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
	substitute, $l_p = 7000$	
$f_2(h_w, l_p, h_c) = 0.50$	substitute, $h_c = 0$	$\rightarrow 431.18012968480300298$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
	substitute, $l_p = 8000$	
$f_2(h_w, l_p, h_c) = 0.50$	substitute, $h_c = 0$	$\rightarrow 491.36209246022380704$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
	substitute, $l_p = 9000$	
$f_2(h_w, l_p, h_c) = 0.50$	substitute, $h_c = 0$	$\rightarrow 550.87030928850357649$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	

$f_2(h_w, l_p, h_c) = 0.50$	substitute, $l_p = 10000$	
	substitute, $h_c = 0$	$\rightarrow 609.76460135267403003$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	

60mm:n pintavalulla:

$f_2(h_w, l_p, h_c) = 0.50$	substitute, $l_p = 4000$	
	substitute, $h_c = 60$	$\rightarrow 119.46119786100495265$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_2(h_w, l_p, h_c) = 0.50$	substitute, $l_p = 5000$	
	substitute, $h_c = 60$	$\rightarrow 167.19158123919889184$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_2(h_w, l_p, h_c) = 0.50$	substitute, $l_p = 6000$	
	substitute, $h_c = 60$	$\rightarrow 210.19496668728590873$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_2(h_w, l_p, h_c) = 0.50$	substitute, $l_p = 7000$	
	substitute, $h_c = 60$	$\rightarrow 251.01747176427242308$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_2(h_w, l_p, h_c) = 0.50$	substitute, $l_p = 8000$	
	substitute, $h_c = 60$	$\rightarrow 290.55331530085742702$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_2(h_w, l_p, h_c) = 0.50$	substitute, $l_p = 9000$	
	substitute, $h_c = 60$	$\rightarrow 329.21283100663107743$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_2(h_w, l_p, h_c) = 0.50$	substitute, $l_p = 10000$	
	substitute, $h_c = 60$	$\rightarrow 367.21675904896437086$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	

Palkin ominaisuudet (Kerto-S):

$$l_p := 4000 \quad h_w := h_w \quad b_w := 51 \quad s_p := 400 \quad E_{\text{mean.p}} := 13800$$

Pintalevyn ominaisuudet (paksuviiluisen havuvaneri):

$$h_f := 21 \quad b_{\text{cef}} := \min(0.1 \cdot l_p, 20 \cdot h_f) = 400 \quad b_{\text{ef}} := \min(b_{\text{cef}} + b_w, s_p) = 400$$

$$E_{\text{mean.fc}} := 5290 \quad E_{\text{mean.fm}} := 8230 \quad E_c := 20000 \quad h_c := h_c \quad b_c := b_c$$

Jäykkyysien suhteen laskettu neutraaliakseli:

$$k_E := \frac{E_{\text{mean.p}}}{E_{\text{mean.fc}}} = 2.609 \quad k_B := \frac{E_c}{E_{\text{mean.fc}}} = 3.781$$

$$y_0 := \frac{b_{\text{ef}} \cdot h_f \cdot \left(\frac{h_f}{2} + h_c\right) + k_E \cdot b_w \cdot h_w \cdot \left(h_f + \frac{h_w}{2} + h_c\right) + k_B \cdot b_c \cdot \frac{h_c}{2}}{b_{\text{ef}} \cdot h_f + k_E \cdot b_w \cdot h_w + k_B \cdot b_c \cdot h_c}$$

Palkin taivutusvastus:

$$I_p := \left[\frac{b_w \cdot h_w^3}{12} + b_w \cdot h_w \cdot \left(\frac{h_w}{2} + h_f + h_c - y_0\right)^2 \right] \quad EI_p := E_{\text{mean.p}} \cdot I_p$$

Pintalevyn taivutusvastus:

$$I_f := \left[\frac{b_{\text{ef}} \cdot h_f^3}{12} + b_{\text{ef}} \cdot h_f \cdot \left(y_0 - h_c - \frac{h_f}{2}\right)^2 \right] \quad EI_f := E_{\text{mean.fc}} \cdot I_f$$

Pintabetonin taivutusvastus:

$$I_c := \left[\frac{b_c \cdot h_c^3}{12} + b_c \cdot h_c \cdot \left(y_0 - \frac{h_c}{2}\right)^2 \right] \quad EI_c := E_c \cdot I_c$$

Kokonaistaivutusvastus:

$$EI_L := EI_c + EI_f + EI_p$$

Lattian pitkäaikaismassa:

$$g_k := 0.5 \cdot 10^{-3} + h_c \cdot 25 \cdot 10^{-6} \quad q_k := 2 \cdot 10^{-3} \quad \psi_2 := 0.3 \quad g_p := 9807 \quad m_p := \frac{g_k + \psi_2 \cdot q_k}{g_p}$$

Lattian taajuus:

$$l_p := l_p$$

$$f_1(h_w, l_p, h_c, b_c) := \frac{\pi}{2 \cdot l_p^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_L}{s_p \cdot m_p}}$$

**Lattiapalkin korkeus, kun lattian taajuus on 9Hz:
Koko betonipoikkileikkaus toimii:**

$f_1(h_w, l_p, h_c, b_c) = 9$	substitute, $l_p = 4000$	
	substitute, $h_c = 60$	
	substitute, $b_c = 400$	$\rightarrow 70.272603547828236225$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_1(h_w, l_p, h_c, b_c) = 9$	substitute, $l_p = 5000$	
	substitute, $h_c = 60$	
	substitute, $b_c = 400$	$\rightarrow 155.70321890191776846$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_1(h_w, l_p, h_c, h_b) = 9$	substitute, $l_p = 6000$	
	substitute, $h_c = 60$	
	substitute, $b_c = 400$	$\rightarrow 230.61506765602345416$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_1(h_w, l_p, h_c, h_b) = 9$	substitute, $l_p = 7000$	
	substitute, $h_c = 60$	
	substitute, $b_c = 400$	$\rightarrow 306.87051906296069969$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_1(h_w, l_p, h_c, h_b) = 9$	substitute, $l_p = 8000$	
	substitute, $h_c = 60$	
	substitute, $b_c = 400$	$\rightarrow 386.74906590402722928$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_1(h_w, l_p, h_c, h_b) = 9$	substitute, $l_p = 9000$	
	substitute, $h_c = 60$	
	substitute, $b_c = 400$	$\rightarrow 470.9279133117553933$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_1(h_w, l_p, h_c, h_b) = 9$	substitute, $l_p = 10000$	
	substitute, $h_c = 60$	
	substitute, $b_c = 400$	$\rightarrow 559.59369866716427006$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	

Puolet betonipoikkileikkauksesta toimii:

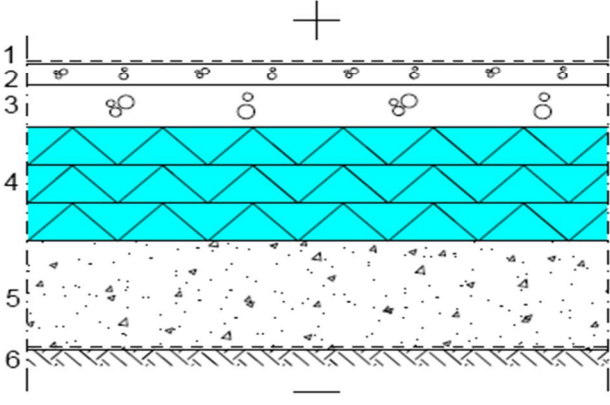
$f_1(h_w, l_p, h_c, h_b) = 9$	substitute, $l_p = 4000$	
	substitute, $h_c = 60$	
	substitute, $b_c = 200$	$\rightarrow 104.51470631323199781$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_1(h_w, l_p, h_c, h_b) = 9$	substitute, $l_p = 5000$	
	substitute, $h_c = 60$	
	substitute, $b_c = 200$	$\rightarrow 179.44658843876981633$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_1(h_w, l_p, h_c, h_b) = 9$	substitute, $l_p = 6000$	
	substitute, $h_c = 60$	
	substitute, $b_c = 200$	$\rightarrow 255.89522156412524162$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_1(h_w, l_p, h_c, h_b) = 9$	substitute, $l_p = 7000$	
	substitute, $h_c = 60$	
	substitute, $b_c = 200$	$\rightarrow 337.09507472714775742$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_1(h_w, l_p, h_c, h_b) = 9$	substitute, $l_p = 8000$	
	substitute, $h_c = 60$	
	substitute, $b_c = 200$	$\rightarrow 423.66944792818708406$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_1(h_w, l_p, h_c, h_b) = 9$	substitute, $l_p = 9000$	
	substitute, $h_c = 60$	
	substitute, $b_c = 200$	$\rightarrow 515.6086986987289193$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	
$f_1(h_w, l_p, h_c, h_b) = 9$	substitute, $l_p = 10000$	
	substitute, $h_c = 60$	
	substitute, $b_c = 200$	$\rightarrow 612.70057800175428455$
	solve, h_w	
	assume, $h_w = \text{RealRange}(0, \infty)$	

Puuvälipohja							Korkeudet laskettu Mathcadilla																					
Lähtötiedot							Ominaistaajuudesta (9Hz)		Hetkellisestä taipumasta (0,50mm)																			
Palkki			Aluslattialevy			Pintabetoni	Palkin minimikorkeus	Palkin minimikorkeus	Neutraaliakseli	Palkki, E _{I_p}	Laippa, E _{I_f}	Pintabetoni, E _{I_c} (N/mm ²)	Laattapalkki, E _{I_T} (N/mm ²)	k _{def}	Laattapalkin lopputila, E _{I_{T,fin}} (N/mm ²)	Kuormat	Taipuma											
Jänneväli I _p (mm)	Jako s _p (mm)	Leveys b _w (mm)	Korkeus h _f (mm)	Toimiva leveys b _{cef} (mm)	Tehollinen leveys b _{ef} (mm)	Paksuus h _c (mm)	h _{w,min1} (mm)	h _{w,min2} (mm)	y ₀ (mm)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)		(N/mm ²)	g _k (N/mm ²)	q _k (N/mm ²)	w _{inst,g} (mm)	w _{inst,q} (mm)	w _{inst} (mm)	Raja I _p /400 (mm)	w _{fin} (mm)	Raja I _p /300 (mm)					
4 000	400	51	21	400	400	0	142,49	245,89	116,68	1,00E+12	5,03E+11	-	1,50E+12	0,655	9,08E+11	0,0005	0,0020	0,7	2,9	3,7	10,0	4,7	13,3					
5 000	400	51	21	420	400	0	203,27	308,51	147,27	1,89E+12	8,33E+11	-	2,73E+12	0,655	1,65E+12	0,0005	0,0020	1,0	4,0	4,9	12,5	6,4	16,7					
6 000	400	51	21	420	400	0	269,48	370,26	177,63	3,19E+12	1,24E+12	-	4,43E+12	0,655	2,68E+12	0,0005	0,0020	1,3	5,0	6,3	15,0	8,1	20,0					
7 000	400	51	21	420	400	0	340,31	431,18	207,71	4,95E+12	1,73E+12	-	6,68E+12	0,655	4,04E+12	0,0005	0,0020	1,5	6,2	7,7	17,5	10,0	23,3					
8 000	400	51	21	420	400	0	415,16	491,36	237,51	7,25E+12	2,29E+12	-	9,54E+12	0,655	5,77E+12	0,0005	0,0020	1,9	7,4	9,3	20,0	11,9	26,7					
9 000	400	51	21	420	400	0	493,61	550,87	267,03	1,01E+13	2,93E+12	-	1,31E+13	0,655	7,89E+12	0,0005	0,0020	2,2	8,7	10,8	22,5	13,9	30,0					
10 000	400	51	21	420	400	0	575,30	609,76	296,29	1,37E+13	3,63E+12	-	1,73E+13	0,655	1,05E+13	0,0005	0,0020	2,5	10,0	12,5	25,0	16,0	33,3					
4 000	400	51	21	400	400	60	187,27	119,46	88,38	4,76E+11	2,71E+11	-	7,47E+11	0,655	4,51E+11	0,0020	0,0020	5,9	5,9	11,8	10,0	16,9	13,3					
5 000	400	51	21	420	400	60	275,98	167,19	131,34	1,38E+12	6,51E+11	-	2,03E+12	0,655	1,23E+12	0,0020	0,0020	5,3	5,3	10,6	12,5	15,1	16,7					
6 000	400	51	21	420	400	60	368,26	210,19	176,65	3,14E+12	1,23E+12	-	4,37E+12	0,655	2,64E+12	0,0020	0,0020	5,1	5,1	10,2	15,0	14,6	20,0					
7 000	400	51	21	420	400	60	465,12	251,02	224,51	6,18E+12	2,04E+12	-	8,21E+12	0,655	4,96E+12	0,0020	0,0020	5,0	5,0	10,1	17,5	14,4	23,3					
8 000	400	51	21	420	400	60	566,52	290,55	274,80	1,10E+13	3,11E+12	-	1,41E+13	0,655	8,53E+12	0,0020	0,0020	5,0	5,0	10,0	20,0	14,3	26,7					
9 000	400	51	21	420	400	60	672,21	329,21	327,35	1,82E+13	4,46E+12	-	2,27E+13	0,655	1,37E+13	0,0020	0,0020	5,0	5,0	10,0	22,5	14,2	30,0					
10 000	400	51	21	420	400	60	781,94	367,22	381,98	2,85E+13	6,13E+12	-	3,47E+13	0,655	2,09E+13	0,0020	0,0020	5,0	5,0	9,9	25,0	14,2	33,3					
$y_0 = \frac{b_{ef} \times h_f \times \frac{h_f}{2} + k_E \times b_w \times h_w \times (h_f + \frac{h_w}{2})}{b_{ef} \times h_f + k_E \times b_w \times h_w}$										E _{mean,p} (N/mm ²)	13800	$k_{def} = \frac{0,6 \times k_E + 0,8}{k_E + 1}$		$w_{inst,g} = \frac{5 \times s_p \times g_k \times l_p^4}{384 \times EI_{T,fin}}$		$w_{fin} = (1 + k_{def}) \times w_{inst,g} + (1 + \psi_2 \times k_{def}) \times w_{inst,q}$												
										E _{mean,f,c} (N/mm ²)	5290																	
										K _E	2,608696																	
										Ψ ₂	3,00E-01	$EI_{T,fin} = \frac{EI_T}{1 + k_{def}}$		$w_{inst,q} = \frac{5 \times s_p \times g_q \times l_p^4}{384 \times EI_{T,fin}}$														
Puubetonivälipohja, täydellinen liittovaikutus (b _c =400)																												
4 000	400	51	21	400	400	60	70,27	-	15,89	1,00E+11	2,92E+09	2,40E+11	3,43E+11	0,655	2,07E+11	0,0020	0,0020	12,9	12,9	25,7	10,0	36,7	13,3					
5 000	400	51	21	420	400	60	155,70	-	32,77	7,00E+11	2,37E+10	1,48E+11	8,71E+11	0,655	5,26E+11	0,0020	0,0020	12,4	12,4	24,7	12,5	35,3	16,7					
6 000	400	51	21	420	400	60	230,62	-	51,31	1,89E+12	7,56E+10	3,62E+11	2,33E+12	0,655	1,41E+12	0,0020	0,0020	9,6	9,6	19,2	15,0	27,4	20,0					
7 000	400	51	21	420	400	60	306,87	-	72,94	3,92E+12	1,75E+11	1,03E+12	5,12E+12	0,655	3,10E+12	0,0020	0,0020	8,1	8,1	16,2	17,5	23,0	23,3					
8 000	400	51	21	420	400	60	386,75	-	97,98	7,08E+12	3,42E+11	2,36E+12	9,78E+12	0,655	5,91E+12	0,0020	0,0020	7,2	7,2	14,4	20,0	20,6	26,7					
9 000	400	51	21	420	400	60	470,93	-	126,49	1,17E+13	5,99E+11	4,61E+12	1,69E+13	0,655	1,02E+13	0,0020	0,0020	6,7	6,7	13,4	22,5	19,1	30,0					
10 000	400	51	21	420	400	60	559,59	-	158,41	1,83E+13	9,74E+11	8,06E+12	2,73E+13	0,655	1,65E+13	0,0020	0,0020	6,3	6,3	12,6	25,0	18,0	33,3					
Puubetonivalipohja, vajaa liittovaikutus (b _c =200)										E _c (N/mm ²)	20000																	
										K _B	3,780718																	
										b _c	400																	
4 000	400	51	21	400	400	60	104,51	-	36,47	1,67E+11	3,16E+10	8,20E+10	2,80E+11	0,655	1,69E+11	0,0020	0,0020	15,8	15,8	31,5	10,0	44,9	13,3					
5 000	400	51	21	420	400	60	179,45	-	60,42	6,59E+11	1,12E+11	2,94E+11	1,06E+12	0,655	6,43E+11	0,0020	0,0020	10,1	10,1	20,2	12,5	28,9	16,7					
6 000	400	51	21	420	400	60	255,90	-	88,01	1,65E+12	2,69E+11	8,80E+11	2,80E+12	0,655	1,69E+12	0,0020	0,0020	8,0	8,0	16,0	15,0	22,8	20,0					
7 000	400	51	21	420	400	60	337,10	-	119,72	3,40E+12	5,32E+11	2,00E+12	5,94E+12	0,655	3,59E+12	0,0020	0,0020	7,0	7,0	13,9	17,5	19,9	23,3					
8 000	400	51	21	420	400	60	423,67	-	155,45	6,25E+12	9,35E+11	3,85E+12	1,10E+13	0,655	6,66E+12	0,0020	0,0020	6,4	6,4	12,8	20,0	18,3	26,7					
9 000	400	51	21	420	400	60	515,61	-	194,96	1,06E+13	1,51E+12	6,60E+12	1,87E+13	0,655	1,13E+13	0,0020	0,0020	6,0	6,0	12,1	22,5	17,2	30,0					
10 000	400	51	21	420	400	60	612,70	-	237,94	1,69E+13	2,30E+12	1,04E+13	2,97E+13	0,655	1,79E+13	0,0020	0,0020	5,8	5,8	11,6	25,0	16,6	33,3					
Puubetonivalipohja, täydellinen liittovaikutus, taipumaraja										b _c	200																	
4 000	400	51	21	400	400	60	165,00	-	34,91	8,10E+11	2,81E+10	1,56E+11	9,94E+11	0,655	6,00E+11	0,0020	0,0020	4,4	4,4	8,9	10,0	12,7	13,3					
5 000	400	51	21	420	400	60	215,00	-	47,20	1,58E+12	6,15E+10	2,86E+11	1,93E+12	0,655	1,17E+12	0,0020	0,0020	5,6	5,6	11,2	12,5	15,9	16,7					
6 000	400	51	21	420	400	60	260,00	-	59,35	2,57E+12	1,08E+11	5,57E+11	3,23E+12	0,655	1,95E+12	0,0020	0,0020	6,9	6,9	13,8	15,0	19,7	20,0					
7 000	400	51	21	420	400	60	310,00	-	73,88	4,02E+12	1,80E+11	1,07E+12	5,27E+12	0,655	3,18E+12	0,0020	0,0020	7,9	7,9	15,7	17,5	22,4	23,3					
8 000	400	51	21	420	400	60	355,00	-	87,77	5,69E+12	2,67E+11	1,75E+12	7,70E+12	0,655	4,65E+12	0,0020	0,0020	9,2	9,2	18,3	20,0	26,2	26,7					
9 000	400	51	21	420	400	60	400,00	-	102,34	7,72E+12	3,76E+11	2,66E+12	1,07E+13	0,655	6,49E+12	0,0020	0,0020	10,5	10,5	21,0	22,5	30,0	30,0					
10 000	400	51	21	420	400	60	450,00	-	119,23	1,04E+13	5,27E+11	3,97E+12	1,49E+13	0,655	9,02E+12	0,0020	0,0020	11,6	11,6	23,1	25,0	32,9	33,3					

LIITE 3: PUUKERROSTALON RAKENNETYYPIT

ALAPOHJA

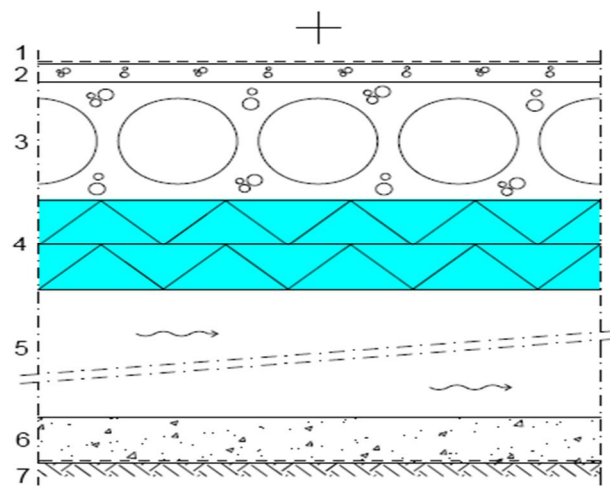
Nro	Rakennekerros	Paloluokka	Esimerkkimateriaali	h (mm)
1	Lattiapinnoite	D-s2, d2	Puuparketti	-
2	Tasausvalu	-	Betonipintavalu	50
3	Kantava rakenne	-	Terasbetonilaatta	120
4	Lämmöneristys	-	Suulakepuristettu polystyreeni	210
5	Kapillaarikatko	-	Salaojasepeli	300
6	Perusmaa	-	-	-



Nimellispaksuus	380	mm
U-arvo	0,16	W/m ² K
Paloluokka	REI 60	-
Ilmaääneneristävyys	-	dB
Askelääneneristävyys	-	dB

Maanvarainen betonirakenteinen alapohja (suurelementti- ja pilari-palkkiteknikka)

Nro	Rakennekerros	Paloluokka	Esimerkkimateriaali	h (mm)
1	Lattiapinnoite	D-s2, d2	Puuparketti	-
2	Tasausvalu	-	Betonipintavalu	50
3	Kantava rakenne	-	Ontelolaatta O27	265
4	Lämmöneristys	-	Suulakepuristettu polystyreeni	200
5	Tuuletus	-	-	800
6	Kapillaarikatko	-	Salaojasepeli	300
7	Perusmaa	-	-	-



Nimellispaksuus	520	mm
U-arvo	0,17	W/m ² K
Paloluokka	REI 60	-
Ilmaääneneristävyys	-	dB
Askelääneneristävyys	-	dB

Tuulettuva betonirakenteinen alapohja (suurelementti- ja pilari-palkkiteknikka)

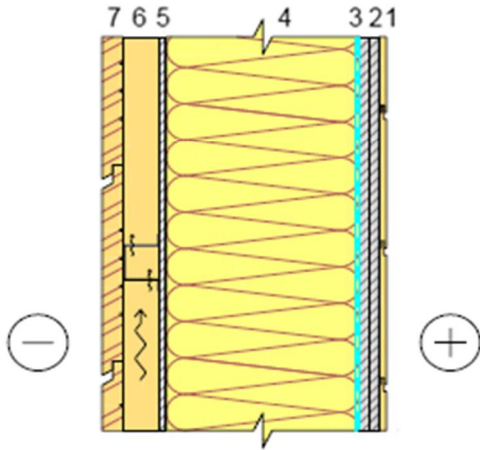
Nro	Rakennekerros	Paloluokka	Esimerkkimateriaali	h (mm)
1	Lattiapinnoite	D-s2, d2	Puuparketti	-
2	Lattialämmitysrakenne	-	Betonipintavalu	50
3	Valusuoja	-	Polypropeenikangas	-
4	Kantava ja jäykistävä runko	D-s2, d2	Kerto-ripa laattapalkki	300
	Lämmöneristys	A2-s1, d0	Mineraalivilla, $\lambda=0,037$	250
5	Tuulensuoja	A2-s1, d0	Tuulensuojamineraalivilla	50
6	Tuulensuojan tukirakenne	-	Puu	25
7	Kannatusrakenne	-	Puu	25
8	Maanpinnan lämmöneristys	-	Kevytsora	200
9	Kapillaarikatko	-	Salaojasepeli	-

Nimellispaksuus	400	mm
U-arvo	0,15	W/m ² K
Paloluokka	REI 60	-
Ilmaääneneristävyys	-	dB
Askelääneneristävyys	-	dB

Tuulettuva rankarakenteinen alapohja (suurelementtitekniikka)

ULKOSEINÄ

Nro	Rakennekerros	Paloluokka	Esimerkkimateriaali	h (mm)
1	Sisäverhous	D-s2, d2	Puulevy	-
2	Palonsuojaverhous (min 10 min)	A2-s1, d0	Kipsilevy	13
	Jäykistävä levytys	D-s2, d2	Kipsilevy	13
3	Höyrynsulkumuovi	-	Höyrynsulkumuovi	-
4	Kantava rankarunko	D-s2, d2	Puutolpat k600	270
	Lämmöneristys	A2-s1, d0	Mineraalivilla, $\lambda=0,037$	270
5	Tuulensuoja	A2-s1, d0	Kipsilevy	9
	Palonsuojaverhous (min 10 min)			
6	Tuuletus	-	-	48
	Julkisivun kiinnitysalusta	-	-	
	Pystypalokatkot kerroksittain	-	-	
7	Julkisivu	D-s2, d2 *	Puupaneeli	28
		B-s2, d0 **	Palosuojattu puupaneeli	



* 1. kerroksessa
** muissa kerroksissa

Nimellispaksuus	390	mm
U-arvo	0,17	W/m ² K
Paloluokka	REI 60	-
Ilmaääneneristävyys	-	dB
Askelääneneristävyys	-	dB

Rankarakenteinen ulkoseinä (suurelementti- pilari-palkki- ja tilaelementtitekniikka)

Nro	Rakennekerros	Paloluokka	Esimerkkimateriaali	h (mm)
1	Sisäverhous	D-s2, d2	Puulevy	-
2	Palonsuojaverhous (min 10 min)	A2-s1, d0	Kipsilevy	13
3	Kantava ja jäykistävä runko	D-s2, d2	CLT	120
4	Lämmöneristys	A2-s1, d0	Mineraalivilla, $\lambda=0,033$	165
5	Tuulensuoja	A2-s1, d0	Kipsilevy	9
	Palonsuojaverhous (min 10 min)			
6	Tuuletus	-	-	48
	Julkisivun kiinnitysalusta	-	-	
	Pystypalokatkot kerroksittain	-	-	
7	Julkisivu	D-s2, d2 *	Puupaneeli	28
		B-s2, d0 **	Palosuojattu puupaneeli	

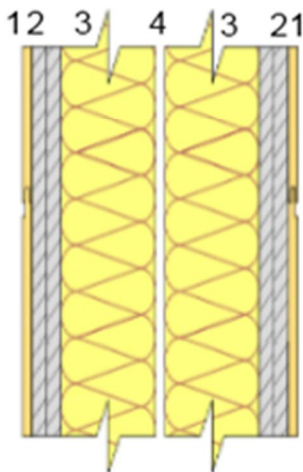
* 1. kerroksessa
** muissa kerroksissa

Nimellispaksuus	390	mm
U-arvo	0,17	W/m ² K
Paloluokka	REI 60	-
Ilmaääneneristävyys	-	dB
Askelääneneristävyys	-	dB

Massiivipuurakenteinen ulkoseinä (suurelementti-, tilaelementti- ja pilari-palkkiteknikka)

HUONEISTOJEN VÄLINEN SEINÄ

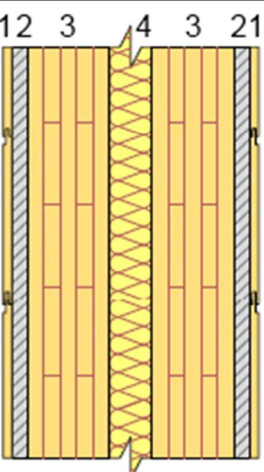
Nro	Rakennekerros	Paloluokka	Esimerkkimateriaali	h (mm)
1	Sisäverhous	D-s2, d2	Puulevy	-
2	Palonsuojaverhous (min 10 min)	A2-s1, d0	Kipsilevy	13
3	Kantava ja jäykistävä runko	D-s2, d2	CLT	120
4	Ääneneristys (täytetty ilmapäli)	A2-s1, d0	Mineraalivilla	50



Nimellispaksuus	320	mm
U-arvo	-	W/m ² K
Paloluokka	REI 60	-
Ilmaääneneristävyys	≥ 55	dB
Askelääneneristävyys	-	dB

Rankarakenteinen huoneistojen välinen seinä (suurelementti- pilari-palkki- ja tilaelementtitekniikka)

Nro	Rakennekerros	Paloluokka	Esimerkkimateriaali	h (mm)
1	Sisäverhous	D-s2, d2	Puulevy	-
2	Palonsuojaverhous (min 10 min)	A2-s1, d0	Kipsilevy	13
3	Kantava ja jäykistävä runko	D-s2, d2	CLT	120
4	Ääneneristys (täytetty ilmapäli)	A2-s1, d0	Mineraalivilla	50

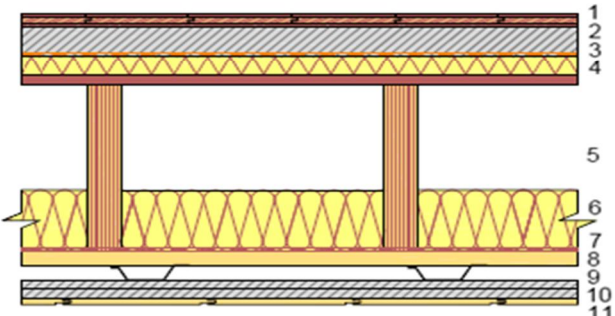


Nimellispaksuus	320	mm
U-arvo	-	W/m ² K
Paloluokka	REI 60	-
Ilmaääneneristävyys	≥ 55	dB
Askelääneneristävyys	-	dB

Massiivirakenne huoneistojen välinen seinä (suurelementti- pilari-palkki- ja tilaelementtitekniikka)

VÄLIPOHJA

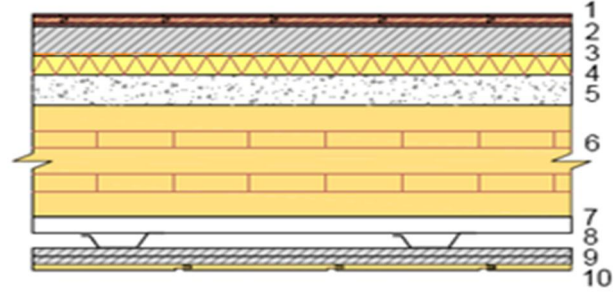
Nro	Rakennekerros	Paloluokka	Esimerkkimateriaali	h (mm)
1	Lattiapinnoite	D-s2, d2	Puuparketti	-
2	Ääneneristys (lisämassa)	A2-s1, d0	Betonipintavalu	50
3	Valusuoja	-	Polypropeenikangas	-
4	Ääneneristys (täytetty ilmapäli)	A2-s1, d0	Askeläänieristevilla	30
5	Kantava ja jäykistävä runko	D-s2, d2	Kerto-ripa laattapalkki	360
6	Ääneneristys (absorboiva massa)	A2-s1, d0	Mineraalivilla	100
7	Ilmansulku	-	Ilmansulkupaperi	-
8	Alakaton kantava rakenne	-	Puu	25
9	Ääneneristys (joustava ranka)	-	Akustiset jousirangat	25
10	Palonsuojaverhous (min 10 min) Ääneneristys (lisämassa)	A2-s1, d0	2 x kipsilevy	26
11	Sisäverhous	D-s2, d2	Puupaneeli	-



Nimellispaksuus	520	mm
U-arvo	-	W/m ² K
Paloluokka	REI 60	-
Ilmaääneneristävyys	≥ 55	dB
Askelääneneristävyys	≤ 53	dB

Rankarakenteinen välipohja 6 m jännevälillä (suurelementti- ja pilari-palkkiteknikka)

Nro	Rakennekerros	Paloluokka	Esimerkkimateriaali	h (mm)
1	Lattiapinnoite	D-s2, d2	Puuparketti	-
2	Ääneneristys (lisämassa)	A2-s1, d0	Betonipintavalu	50
3	Valusuoja	-	Polypropeenikangas	-
4	Ääneneristys (täytetty ilmapäli)	A2-s1, d0	Askeläänieristevilla	30
5	Ääneneristys (lisämassa)	A2-s1, d0	Kalkkikivirouhe	50
6	Kantava ja jäykistävä runko	D-s2, d2	CLT	320
7	Alakaton kantava rakenne	-	Puu	25
8	Ääneneristys (joustava ranka)	-	Akustiset jousirangat	25
9	Palonsuojaverhous (min 10 min) Ääneneristys (lisämassa)	A2-s1, d0	2 x kipsilevy	26
10	Sisäverhous	D-s2, d2	Puupaneeli	-



Nimellispaksuus	530	mm
U-arvo	-	W/m ² K
Paloluokka	REI 60	-
Ilmaääneneristävyys	≥ 55	dB
Askelääneneristävyys	≤ 53	dB

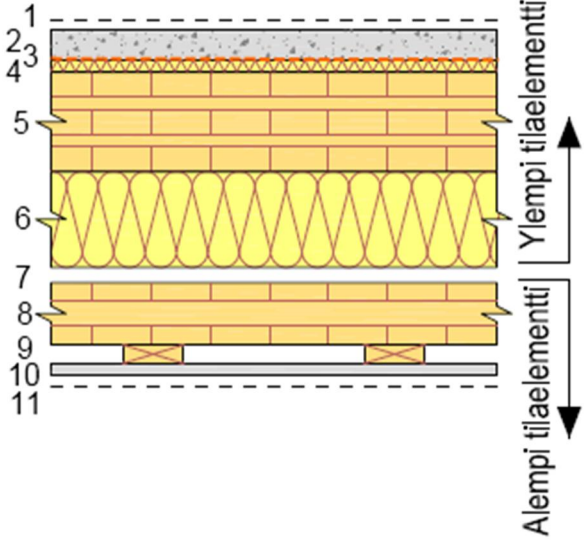
Massiivirakenteinen välipohja 6 m jännevälillä (suurelementti- ja pilari-palkkiteknikka)

Nro	Rakennekerros	Paloluokka	Esimerkkimateriaali	h (mm)
1	Lattiapinnoite	D-s2, d2	Puuparketti	-
2	Ääneneristys (lisämassa)	A2-s1, d0	Betonipintavalu	50
3	Valusuoja	-	Polypropeenikangas	-
4	Ääneneristys (täytetty ilmaväli)	A2-s1, d0	Askeläänieristevilla	30
5	Kantava ja jäykistävä runko	D-s2, d2	Liimapuulaattapalkki	240
6	Ääneneristys (absorboiva massa)	A2-s1, d0	Mineraalivilla	100
7	Ilmansulku	-	Ilmansulkupaperi	-
8	Ääneneristysvillan kantava rakenne	-	Puu	25
9	Asennusväli (elementtien sauma)	-	-	25
10	Itsensä kantava runko	-	Puu	125
11	Palonsuojaverhous (min 10 min) Ääneneristys (lisämassa)	A2-s1, d0	2 x kipsilevy	26
12	Sisäverhous	D-s2, d2	Puupaneeli	-

Nimellispaksuus	625	mm
U-arvo	-	W/m ² K
Paloluokka	REI 60	-
Ilmaääneneristävyys	≥ 55	dB
Askelääneneristävyys	≤ 53	dB

Rankarakenteinen välipohja 4 m jännevälillä (tilaelementtitekniikka)

Nro	Rakennekerros	Paloluokka	Esimerkkimateriaali	h (mm)
1	Lattiapinnoite	D-s2, d2	Puuparketti	-
2	Ääneneristys (lisämassa)	A2-s1, d0	Betonipintavalu	50
3	Valusuoja	-	Polypropeenikangas	-
4	Ääneneristys (täytetty ilmapäli)	A2-s1, d0	Askeläänieristevilla	30
5	Kantava ja jäykistävä runko	D-s2, d2	CLT	260
6	Ääneneristys (absorboiva massa)	A2-s1, d0	Mineraalivilla	100
7	Asennusväli (elementtien sauma)	-	-	25
8	Itsensä kantava runko	-	CLT	120
9	Kipsilevyverhouksen kantava runko	-	Puu	25
10	Palonsuojaverhous (min 10 min) Ääneneristys (lisämassa)	A2-s1, d0	Kipsilevy	13
11	Sisäverhous	D-s2, d2	Puupaneeli	-

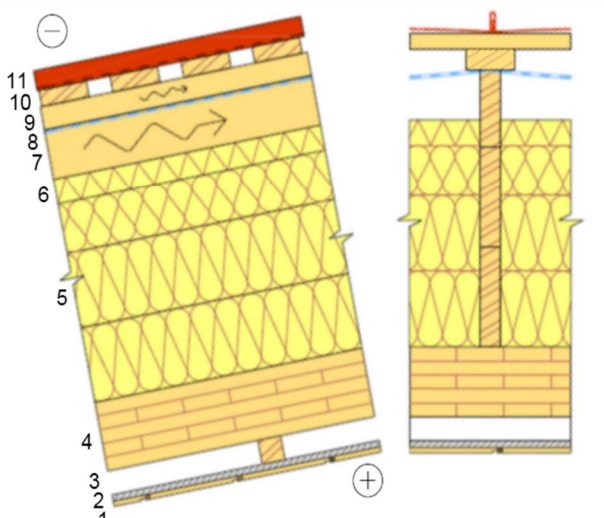


Nimellispaksuus	625	mm
U-arvo	-	W/m ² K
Paloluokka	REI 60	-
Ilmaääneneristävyys	≥ 55	dB
Askelääneneristävyys	≤ 53	dB

Massiivirakenteinen välipohja 4 m jännevälillä (tilaelementtitekniikka)

YLÄPOHJA

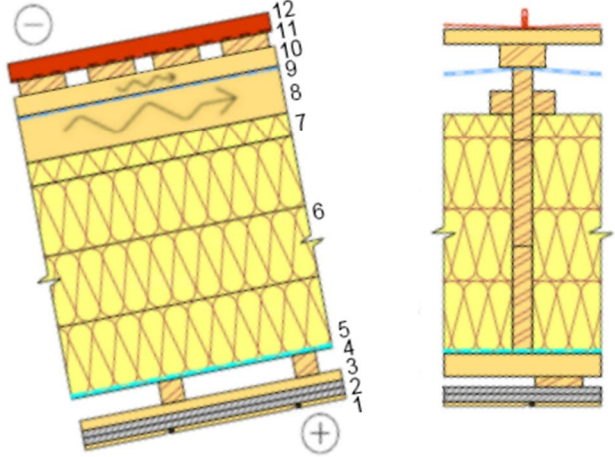
Nro	Rakennekerros	Paloluokka	Esimerkkimateriaali	h (mm)
1	Sisäverhous	D-s2, d2	Puulevy	-
2	Palonsuojaverhous (min 10 min)	A2-s1, d0	Kipsilevy	13
3	Alakaton kantava rakenne	-	Puu	50
4	Kantava ja jäykistävä runko	D-s2, d2	CLT	320
5	Lämmöneristys	A2-s1, d0	Mineraalivilla, $\lambda=0,037$	400
	NR-palkit k900	-	Puu	550
6	Tuulensuoja	A2-s1, d0	Tuulensuojamineraalivilla	50
7	Tuuletus	-	-	100
8	Aluskate	-	Diffuusioavoin kuitukangaskate	-
9	Tuuletus	-	-	50
	Aluskatteen kiinnitys		Puu	
10	Vesikatteen kiinnitys	-	Puu	32
11	Vesikate	-	Konesaumapeltikate	-



Nimellispaksuus	1020	mm
U-arvo	0,09	W/m ² K
Paloluokka	REI 60	-
Ilmaääneneristävyys	-	dB
Askelääneneristävyys	-	dB

Massiivirakenteinen yläpohja (suurelementti-, pilari-palkkiteknikka)

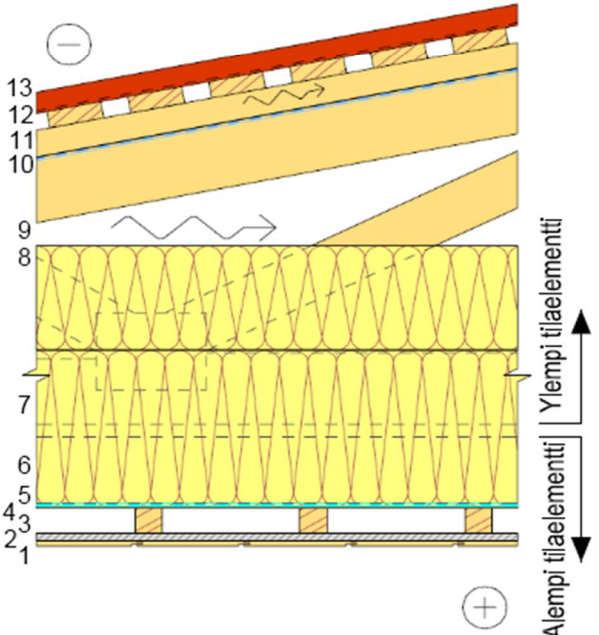
Nro	Rakennekerros	Paloluokka	Esimerkkimateriaali	h (mm)
1	Sisäverhous	D-s2, d2	Puulevy	-
2	Palonsuojaverhous (min 10 min)	A2-s1, d0	Kipsilevy	13
	Jäykistävä levytys	D-s2, d2	Kipsilevy	13
3	Alakaton kantava rakenne	-	Puu	75
4	Höyrynsulun tukilevy	-	Puukuitulevy	3
5	Höyrynsulkumuovi	-	Höyrynsulkumuovi	-
6	Lämmöneristys	A2-s1, d0	Mineraalivilla, $\lambda=0,037$	450
	Kantava rakenne	-	NR-palkit k900	600
7	Tuulensuoja	A2-s1, d0	Tuulensuojamineraalivilla	50
8	Tuuletus	-	-	100
9	Aluskate	-	Diffuusioavoin kuitukangaskate	-
10	Tuuletus	-	-	50
	Aluskatteen kiinnitys	-	Puu	
11	Vesikatteen kiinnitys	-	Puu	32
12	Vesikate	-	Konesaumapeltikate	-



Nimellispaksuus	795	mm
U-arvo	0,09	W/m ² K
Paloluokka	REI 60	-
Ilmaääneneristävyys	-	dB
Askelääneneristävyys	-	dB

Rankarakenteinen yläpohja (suurelementti-, pilari-palkkiteknikka)

Nro	Rakennekerros	Paloluokka	Esimerkkimateriaali	h (mm)
1	Sisäverhous	D-s2, d2	Puulevy	-
2	Palonsuojaverhous (min 10 min)	A2-s1, d0	Kipsilevy	13
3	Alakaton kantava rakenne	-	Puu	50
4	Höyrynsulun tukilevy	-	Puukuitulevy	3
5	Höyrynsulkumuovi	-	Höyrynsulkumuovi	-
6	Itsensä kantava runko	-	Puu	125
7	Lämmöneristys	A2-s1, d0	Mineraalivilla, $\lambda=0,037$	500
8	Kantava rakenne	D-s2, d2	NR-ristikot	-
9	Tuuletus	-	-	100
10	Aluskate	-	Diffuusioavoin kuitukangaskate	-
11	Tuuletus	-	-	50
	Aluskatteen kiinnitys	-	Puu	
12	Vesikatteen kiinnitys	-	Puu	32
13	Vesikate	-	Konesaumapeltikate	-



Nimellispaksuus	-	mm
U-arvo	0,09	W/m ² K
Paloluokka	REI 60	-
Ilmaääneneristävyys	-	dB
Askelääneneristävyys	-	dB

Ristikkorakenteinen yläpohja (tilaelementtitekniikka)